

Sílvia Santos

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DE
CINZA DE CASCA DE ARROZ RESIDUAL EM
ARGAMASSAS E CONCRETOS**

**Dissertação apresentada ao Curso de
Pós-Graduação em Engenharia Civil
da Universidade Federal de Santa
Catarina, como parte dos requisitos
para a obtenção do título de Mestre
em Engenharia Civil.**

Florianópolis

1997

ESTUDO DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ RESIDUAL EM ARGAMASSAS E CONCRETOS

Sílvia Santos

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

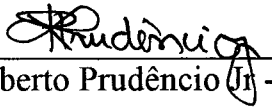
Orientador: Prof. Dr Luiz Roberto Prudêncio Jr

Florianópolis

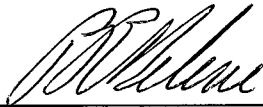
1997

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em 15 de agosto de 1.997 ,
pela comissão examinadora



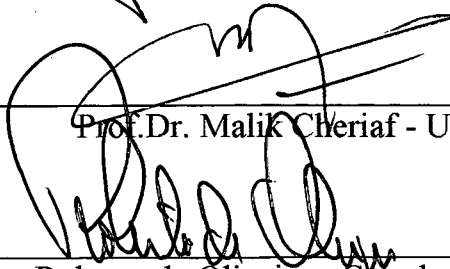
Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr - Orientador - Moderador



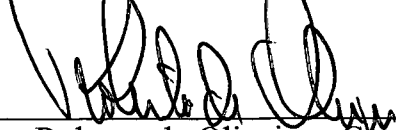
Prof. Dr Paulo Roberto do Lago Helene - USP



Prof. Dra. Janaíde Cavalcante Rocha - UFSC



Prof.Dr. Malik Cheriaf - UFSC



Prof. Dr. Roberto de Oliveira - Coordenador do CPGEC

AGRADECIMENTOS

Um trabalho de pesquisa, em especial quando se trata de um trabalho experimental, nunca se faz de forma isolada. Sempre há aquelas pessoas e instituições que, de uma forma ou de outra se tornam fundamentais e indispensáveis à sua realização. Assim sendo, é nosso dever agradecer à colaboração daqueles que cooperaram com esta investigação.

Acima de tudo, agradeço a Deus pela vida e pela coragem que sempre me acompanha a cada novo desafio.

Aos meus pais e à minha irmã, pela confiança, carinho e apoio ao longo de todos os meus anos de estudo e, de forma especial, neste período de mestrado.

À CAPES, Fundação Banco do Brasil e FINEP pelo suporte financeiro.

Ao professor, orientador e amigo Luiz Roberto Prudêncio Jr, pela dedicação, seriedade, competência e incentivo demonstrados antes e durante a realização deste trabalho.

Ao SENAI da cidade de Tijuca, em especial aos funcionários “seu” Jerônimo, “Zildo” e Patrícia, pela ajuda e companhia durante os longos dias e noites empregados para a montagem de material.

À CONCREBRAS S/A, na pessoa de seu gerente Roney Martins de Miranda, pelo espaço físico cedido para a realização de parte dos ensaios

pertinentes a esta pesquisa, por ocasião do incêndio que acometeu as instalações dos laboratórios de Engenharia Civil da UFSC.

Às companhias de cimento ITAMBÉ e VOTARAN (Curitiba/PR), pela realização dos ensaio de caracterização de cimento e cinzas em suas instalações.

Aos funcionários do LABMAT (Paulo e Renata) e do LMCC (Renato e Luiz Henrique), pelo apoio e ajuda irrestritos durante a fase experimental da pesquisa.

Aos colegas de turma, Dario Dafico e Mário Paz, pela convivência agradável, estímulo e cooperação na busca dos melhores resultados.

Às colegas Giovanna Gava - a *Gi* - e Luciana Lengler - a *Luca* -, pela parceria nas discussões, pelas idéias, pelo trabalho braçal e pelas muitas gargalhadas durante todo o período de nossa convivência na UFSC.

A Dorval Aguiar, por estar sempre disponível a ajudar, mesmo estando distante.

Ao companheiro de jornada Artêmio Frazon Jr - *Junico* - pela colaboração e companheirismo durante a fase mais difícil deste trabalho.

À Márcio Santana de Carvalho pelo suporte na área da informática, pela ajuda prestimosa nos longos finais de semana de “trabalho escravo” e, sobretudo, por ter proporcionado tantos bons momentos que melhoraram minha vida e mudaram minha história.

*Este trabalho é carinhosamente dedicado
àqueles que sempre acreditaram:
Meus pais, Valmor e Santilha
e minha irmã, Silvana*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	ix
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii

1. INTRODUÇÃO

2. POZOLANAS

2.1 DEFINIÇÕES	7
2.2 CLASSIFICAÇÃO DAS ADIÇÕES	8
2.3 COMPOSIÇÃO	10
2.4 O USO DAS POZOLANAS EM ADIÇÃO AO CIMENTO	12
2.5 A REAÇÃO POZOLÂNICA	15
2.6 MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA	17
2.7 POZOLANAS QUE SE DESTACAM	20

3. CINZA DE CASCA DE ARROZ

3.1 CONSIDERAÇÕES	23
3.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS	25
3.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA	27
3.4 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE QUEIMA E DO GRAU DE MOAGEM	27
3.5 A REAÇÃO POZOLÂNICA DA CINZA DE CASCA DE ARROZ	32

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 DESENVOLVIMENTO	36
4.2 LEVANTAMENTO DOS CENTROS PRODUTORES DE CCA	37
4.3 PROGRAMA PILOTO	42
4.3.1 Moagem	42
4.3.2 Pozolanicidade com cimento	43
4.3.3 Resistência	45
4.3.4 Análise dos resultados	48
4.4 PROGRAMA DE ENSAIOS	52
4.4.1 Materiais e Equipamentos Utilizados	52
4.4.2 Ensaios Realizados	64
<u>5. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</u>	<u>77</u>
5.1 POZOLANICIDADE COM CIMENTO	77
5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE ARGAMASSAS	84
5.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE CONCRETOS	90
<u>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</u>	<u>101</u>
6.1 CONCLUSÕES	101
6.1.1 Influência do processo de queima no IAP da CCA residual	101
6.1.2 Influência do grau de moagem no IAP da CCA residual	102
6.1.3 Resistência das argamassas produzidas com CCA residual	102
6.1.4 Resistência dos concretos produzidos com CCA residual	103
6.1.5 Uso da CCA residual em substituição parcial do cimento Portland	103
6.2 RECOMENDAÇÕES PARA OUTROS TRABALHOS	104
<u>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>105</u>

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Efeitos de quantidades crescentes de pozolana sobre o calor de hidratação do cimento Portland. (MASSAZZA, apud MEHTA, 1994).	16
Figura 2.2 - Gráfico do ensaio de pozolanicidade (MB 1154/91)	20
Figura 2.3 - Efeito da sílica ativa na resistência aos 28 dias de pasta e concreto de relação a/c 0,33 (BENTUR, 1989).	21
Figura 3.1 - Depósito de cinza de casca de arroz ao longo de estradas vicinais	24
Figura 3.2 - Organograma de aplicações da cinza de casca de arroz (SILVA, 1994).	25
Figura 3.3 - Micrografia eletrônica de varredura da cinza de casca de arroz queimada a 560°C (SILVEIRA e RUARO, 1995)	26
Figura 3.4 - Relação entre tempo de moagem e temperatura de queima da cinza de casca de arroz, queimada a várias temperaturas, por 2 horas (AL-KHALAF e YOUSIFT, 1984)	31
Figura 3.5 - Reatividade com a cal, da cinza de casca de arroz produzida a diferentes temperaturas e tempos de moagem (JAMES e RAO, 1986).	34
Figura 4.1 - Queima da casca de arroz pelo sistema artesanal - tipo grelha	38
Figura 4.2 - Queima da casca de arroz pelo sistema semi-industrial	39
Figura 4.3 - Queima da casca de arroz pelo sistema industrializado	40
Figura 4.4 - Moinho giratório, com revestimento interno e carga de alumina, empregado na moagem a CCA	42
Figura 4.5 Detalhe do ensaio de consistência <i>flow table</i>	47
Figura 4.6 - Demanda de água no ensaio de pozolanicidade	48
Figura 4.7 - Micrografia da CCA (a) 15 minutos de moagem; (b) 20 horas e moagem	49
Figura 4.8 - Variação do IAP com o tempo de moagem	51
Figura 4.9 - Resistência das argamassas contendo diferentes teores de CCA	51
Figura 4.10 - Fluxograma simplificado: geração de cinza a partir da queima da casca de arroz em leito fluidizado (CIENTEC, 1986)	60

Figura 4.11 - Prensa hidráulica utilizada para o ensaio de resistência à compressão axial de corpos-de-prova de concreto e argamassa.	63
Figura 4.12- Corpos-de-prova de argamassa ao serem retirados da água	70
Figura 4.13 - Corpo-de-prova de argamassa com cinza de casca de arroz, após o rompimento	71
Figura 4.14 - Aspecto do concreto com cinza de casca de arroz, durante o ensaio de abatimento <i>slump test</i> .	74
Figura 4.15 - Corpos-de-prova de concreto ao serem retirados da água. Da esquerda para a direita: referência, sílica ativa, cinza volante, cinza de casca de arroz	74
Figura 5.1 - Efeito significativo do processo de queima no IAP de cinzas de casca de arroz residuais	81
Figura 5.2 - Efeito significativo da data da coleta no IAP das cinzas de casca de arroz residuais	81
Figura 5.3 - Efeito significativo do tempo de moagem no IAP das cinzas de casca de arroz residuais	82
Figura 5.4 - Efeito significativo do processo de queima e do tempo de moagem no IAP das CCA residuais	84
Figura 5.5 Evolução de resistência de argamassas - 15% de CCA	86
Figura 5.6 - Evolução de resistência de argamassas - 40% de CCA	86
Figura 5.7 - Evolução de resistência de argamassas com CCA - F e SA	88
Figura 5.8 - Difratoograma de Raios-X : cinza da indústria F	89
Figura 5.9 - Difratoograma de Raios-X: cinza da indústria P	90
Figura 5.10 - Evolução de resistência dos concretos - $a/c_p = 0,4$	91
Figura 5.11 - Evolução de resistência dos concretos - $a/c_p = 0,5$	92
Figura 5.12 - Evolução de resistência dos concretos - $a/c_p = 0,6$	93
Figura 5.13 - Desenvolvimento da resistência à compressão de concretos com diferentes relação a/c_p (teor de CCA em volume = 15%)	95
Figura 5.14 - Desenvolvimento da resistência à compressão de concretos com diferentes relação a/c_p (teor de CCA = 10%). (ZHANG e MALHOTRA, 1996)	95

Figura 5.16 - Correlação entre resistência de concreto e argamassa contendo 40%
de CCA - $a/c_p = 0,4$ 97

Figura 5.17 - Correlação entre resistência de concreto e argamassa contendo 15%
de CCA - $a/c_p = 0,5$ 98

Figura 5.18 - Correlação entre resistência de concreto e argamassa contendo 40%
de CCA - $a/c_p = 0,5$ 98

Figura 5.19 - Correlação entre resistência de concreto e argamassa contendo 15%
de CCA - $a/c_p = 0,6$ 99

Figura 5.20 - Correlação entre resistência de concreto e argamassa contendo 40%
de CCA - $a/c_p = 0,6$ 99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Quantidade de cinza gerada por resíduo agrícola (MEHTA, 1992)	2
Tabela 1.2 - Disponibilidade de cinza: safra 1994 (IBGE, 1996)	3
Tabela 2.1 - Classificação das pozolanas estabelecida pela NBR 12653	10
Tabela 2.2 - Propriedades químicas - NBR 12653	10
Tabela 2.3 - Propriedades físicas - NBR 12653	11
Tabela 4.1 - Sistemas de produção de CCA em Santa Catarina	37
Tabela 4.2 - Área específica referente aos tempos de moagem da CCA do programa piloto	43
Tabela 4.3 - Caracterização do cimento	44
Tabela 4.4 - Índice de atividade pozolânica	45
Tabela 4.5 - Resistência aos 28 dias	48
Tabela 4.6 - Caracterização do cimento utilizado na fabricação dos concretos.	53
Tabela 4.7 - Caracterização do agregado miúdo	54
Tabela 4.8 - Caracterização do agregado graúdo	55
Tabela 4.9 - Características físicas da sílica ativa	56
Tabela 4.10 - Características químicas da sílica ativa	56
Tabela 4.11 - Caracterização da CCA - indústria F	57
Tabela 4.12 - Caracterização da CCA - indústria G	57
Tabela 4.13 - Caracterização da CCA - indústria P	58
Tabela 4.14 - Caracterização da CCA - indústria R	58
Tabela 4.15 - Características físicas e químicas da CCA produzida em leito fluidizado e da cinza volante	61

Tabela 4.16 - Vidrarias	62
Tabela 4.17 -Área específica	65
Tabela 4.18 - Dosagem de material para ensaio de pozolanicidade com cimento - indústria F	66
Tabela 4.19 - Dosagem de material para ensaio de pozolanicidade com cimento - indústria G	66
Tabela 4.20 - Dosagem de material para ensaio de pozolanicidade com cimento - indústria P	67
Tabela 4.21 - Dosagem de material para ensaio de pozolanicidade com cimento - indústria R	67
Tabela 4.22 - Dosagem de material para ensaio de pozolanicidade com cimento - cinza produzida em Leito Fluidizado, Cinza Volante e Sílica Ativa	68
Tabela 4.23 - Tempo de moagem escolhido para ensaio de resistência à compressão, para cada uma das CCA.	69
Tabela 4.24 - Dosagem de material para ensaio de resistência à compressão de argamassas com 15% de CCA	69
Tabela 4.25 - Dosagem de material para ensaio de resistência à compressão de argamassas com 40% de CCA	70
Tabela 4.26 - Relação dos concretos confeccionados	72
Tabela 4.27 - Dosagem de material - $a/c_p = 0,4$	75
Tabela 4.28 - Dosagem de material - $a/c_p = 0,5$	75
Tabela 4.29 - Dosagem de material - $a/c_p = 0,6$	75
Tabela 5.1 - Índice de atividade pozolânica com cimento - indústria F	77
Tabela 5.2 - Índice de atividade pozolânica com cimento - indústria G	78
Tabela 5.3 - Índice de atividade pozolânica com cimento - indústria P	78
Tabela 5.4 - Índice de atividade pozolânica com cimento - indústria R	79
Tabela 5.5 - Índice de atividade pozolânica com cimento - cinza produzida em Leito Fluidizado, Cinza Volante e Sílica Ativa	79
Tabela 5.6 - Resultados obtidos na análise de variância do IAP	80
Tabela 5.7 - Teste de normalidade da amostra - Komolgorov-Smirnov	82

Tabela 5.8 - Resistência à compressão de argamassa - 15% de CCA	85
Tabela 5.9 Resistência à compressão de argamassa - 40% de CCA	85
Tabela 5.10 - Resistência à compressão concreto - $a/c_p = 0,4$	91
Tabela 5.11 - Resistência à compressão concreto - $a/c_p = 0,5$	92
Tabela 5.12 - Resistência à compressão concreto - $a/c_p = 0,6$	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c: relação água/cimento

a/cc: relação água/(cimento+cinza de casca de arroz)

a/cp: relação água/(cimento+pozolana)

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI: *American Concrete Institute*

ASTM: *American Society for Testing Materials*

art G: processo de queima artesanal- indústria G

BS: *British Standard*

CANMET: *Canada Center for Mineral Energy Technology*

C₂S: silicato bicálcico

C₃S: silicato tricálcico

C₃A: Aluminato tricálcico

C₄AF: ferroaluminato tetracálcico

CCA: cinza de casca de arroz

CCA 15: concreto com 15% de cinza de casca de arroz

CCA 40: concreto com 40% de cinza de casca de arroz

CIENTEC: Fundação de Ciência e Tecnologia

CH: hidróxido de cálcio

C-S-H: silicatos de cálcio hidratados

CSA: *Canadian Standards Association*

CV: cinza volante de carvão mineral

CV 40: concreto com 40% de cinza volante de carvão mineral

FATMA: Fundação de Amparo e Tecnologia do Meio Ambiente

γ_{cal} : massa específica da cal

$\gamma_{cimento}$: massa específica do cimento

$\gamma_{pozolana}$: massa específica da pozolana

IAP: índice de atividade pozolânica

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas

ind F: processo de queima industrializado - indústria F

EPUSP: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RHA: *rice husk ash*

RILEM: *Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et des Recherches sur les Matériaux et les Constructions*

SA: sílica ativa

SA 15: concreto com 15% de sílica ativa

semi P: processo de queima semi-industrializado - indústria P

semi R: processo de queima semi-industrializado - indústria R

RESUMO

O uso de cinzas provenientes de processos geradores de energia como adição ao cimento Portland tem sido incentivado ao longo dos anos, por dois fatores principais: economia de energia no processo de produção do material e despoluição do meio ambiente. Entre estas cinzas, destaca-se a cinza de casca de arroz - CCA - dada a sua elevada atividade pozolânica, comprovada em diversos trabalhos desenvolvidos nas últimas décadas. A presente investigação tem como propósito avaliar a influência do processo de queima e do grau de moagem sobre as propriedades pozolânicas da cinza de casca de arroz residual, produzida nas beneficiadoras do sul do estado de Santa Catarina, sob condições de queima (tempo e temperatura) diferentes e a manutenção dessas propriedades ao longo do tempo. Foram selecionadas cinzas produzidas por 4 processos de queima diferentes, típicos da região. O programa experimental incluiu coleta de amostras em épocas distintas, moagem do material a diferentes áreas específicas (equivalentes aos tempos de moagem de 2, 4 e 6 horas) em moinho padronizado, análise do índice de atividade pozolânica dessas cinzas e a compatibilidade das mesmas em concretos e argamassas, usando-se diferentes teores de substituição (15% e 40%). O desempenho do material é comparado ao da sílica ativa e da cinza volante de carvão mineral nos mesmos teores de substituição. Em geral, os concretos e argamassas apresentaram resistência à compressão superiores quando comparados ao controle (sem adições) nas idades estudadas (3, 7, 28 e 90 dias). Estes resultados foram equivalentes àqueles apresentados pela sílica ativa e, com relação à cinza volante, o desempenho da CCA foi sempre superior.

ABSTRACT

The use of ashes originated from energy generating processes in addition to Portland cement, has been stimulated during many years due to two main factors: the need to conserve energy and resources and despollution of the environment. Rice husk ash - RHA - stood out among the various kinds of ash due to its high pozzolanic activity, several studies developed in the recent decades have observed. The main purpose of this investigation is to evaluate the effects of the burning process and degree of grinding on the pozzolanic properties of RHA, produced in the south of Santa Catarina, under different incineration conditions (time and temperature) and variations of these properties over time. Four different typical burning process were selected. For this reason, the experimental program included specimen collection in distinct periods of time, material grinded in different specific surface (equivalent to 2, 4 and 6 hours in a standard mill) and the analysis of the pozzolanic activity index of these ashes and their compatibility in the concretes and mortars, using different cement replacement percentage (15% and 40%). The material performance is compared to that of silica fume and fly ash in the same percentages of cement replacement. In general, the RHA concrete and mortars showed higher compressive resistance in relation to control mix (without mineral additives) of the evaluated ages (3, 7, 28 and 90 days). These results were similar to those obtained by the use of silica fume and superior when compared to the fly ash mixes performance.

1. INTRODUÇÃO

A sociedade atual vem exigindo, cada vez mais, não só um bom desempenho dos materiais ou da construção, sob o ponto de vista técnico e funcional, mas principalmente, de suas interações com o meio ambiente, em busca daqueles cuja obtenção ou utilização se faça com o mínimo consumo energético e menor impacto ecológico. MEHTA (1992) declara que a escolha dos materiais de construção no futuro deveria atender ao quádruplo enfoque iniciado pela letra E: Engenharia, Economia, Energia e Ecologia.

A utilização de resíduos industriais e agrícolas na construção civil, principalmente os poluentes, contribui para este quadro de engenharia do futuro descrito acima.

Arroz, trigo e milho, representam as maiores colheitas em se tratando de cereais. As partes não aproveitáveis destes cereais como, folhas, caule e casca, são, em geral, considerados lixo e, por seu volume, contribuem para um dos maiores problemas deste final de milênio: a eliminação dos resíduos gerados pela indústria e pela agricultura.

Dentre estes resíduos, as cinzas ocupam lugar de destaque, já que a maioria dos processos de geração de energia, apresentam como subproduto, a geração de cinzas. Grande parte destas cinzas, apresenta características pozolânicas. Isoladas, as cinzas não têm valor aglomerante. Entretanto, quando finamente moídas e em presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), e formam compostos cimentantes.

Entre os resíduos da agricultura, a casca de arroz, pela cinza gerada quando de sua combustão, tem recebido atenção especial dos pesquisadores de cimento por várias razões. Em muitos dos países produtores de arroz, o volume de cinza produzido é bastante grande e apenas a indústria cimenteira poderia consumir tal quantidade de resíduo. A Tabela 1.1 mostra que nenhum outro resíduo da agricultura produz tanta quantidade de cinza quando queimado.

Tabela 1.1 - Quantidade de cinza gerada por resíduo agrícola (MEHTA, 1992)

Cereal	Parte da planta	Cinza (% em peso)
milho	folha	12
arroz	casca	20
arroz	palha	14
cana de açúcar	bagaço	15
girassol	folhas e talo	11
trigo	folhas	10

As mudanças ocorridas ao longo do tempo no processo de beneficiamento de arroz, obrigou as usinas a gerarem energia para a secagem do produto: Antes utilizando a queima da madeira, hoje as usinas secam o arroz, incinerando sua casca. Todavia, a utilização deste combustível gera um volume muito grande de cinza que, normalmente lançada nos cursos d'água, leva à poluição e contaminação de mananciais. No Estado de Santa Catarina, a Fundação de Amparo e Tecnologia do Meio Ambiente - FATMA, exige a instalação de um sistema constituído de silo separador e decantação para reter a cinza junto às beneficiadoras, evitando, desta forma, que a mesma seja lançada no meio ambiente. Como não há emprego para a cinza recolhida, o material é lançado em terrenos baldios, ao longo de estradas vicinais ou ainda, clandestinamente, nos rios.

A produção mundial de arroz em casca no ano de 1994 (IBGE, 1996) foi de 534,7 milhões de toneladas, sendo a maior produtora mundial a China, seguida pela Índia, Indonésia e Bangladesh. O Brasil, com uma produção de 10,5 milhões de toneladas, ocupava o 10º lugar na lista dos produtores mundiais. O Estado líder na produção foi o Rio Grande do Sul, responsável por 41,7 % da referida safra e Santa Catarina ocupou o 5º lugar com 7,4 % da produção nacional. Como a cinza representa aproximadamente 4 % em peso do arroz em casca, resultam os valores da Tabela 1.2 para a disponibilidade anual de cinza de casca de arroz:

Tabela 1.2 - Disponibilidade de cinza: safra 1994 (IBGE, 1996)

Mundial	21,38 milhões de toneladas
Brasil	4,2 milhões de toneladas
Rio Grande do Sul	1,75 milhões de toneladas
Santa Catarina	310,8 mil toneladas

Cabe ressaltar que 87,77% da produção de arroz nacional esta concentrada em apenas 10 estados e que 1/3 da desta produção é beneficiada somente em cidades de médio porte ou grandes centros urbanos.

O uso da cinza de casca de arroz como material pozolânico, é justificado por contribuir para a despoluição do meio ambiente, por melhorar as características de concretos e argamassas com ela confeccionados e por gerar economia de energia necessária à produção do clínquer de cimento Portland, quando na produção de cimento este é substituído parcialmente pela pozolana. Entretanto, o uso de pozolanas como um constituinte essencial do sistema cimentante, nos leva a duas questões:

- (i) como controlar a uniformidade do material não apenas originário de uma única fonte, mas de todas as fontes disponíveis numa região ou em um país; e

- (ii) como assegurar que esta adição seja utilizada corretamente, para que seu desempenho seja satisfatório para concretos e argamassas e, em particular, preserve, a longo prazo, a durabilidade das obras realizadas com uso de cimentos com estas adições.

Muitas pesquisas sobre a utilização de adições minerais, como pozolanas, têm sido realizadas nos últimos tempos, como comprovam os trabalhos publicados nos quatro Congressos Internacionais sobre cinza volante, sílica ativa, escórias e pozolanas naturais, organizados pelo ACI - American Concrete Institute (EUA) - e CANMET - Canada Center for Mineral and Energy Technology (Canadá) - em 1983, 1986, 1989, 1992.

Todavia, a maioria dos trabalhos desenvolvidos utilizando a cinza de casca de arroz como material pozolânico, não chega a um consenso sobre a temperatura de queima, e tempo de moagem ideal (área específica desejada) para a obtenção de um material com características pozolânicas ideais. Além disso, em geral, os trabalhos são desenvolvidos com cinzas queimadas em fornos pilotos onde todas as condições de queima são rigorosamente controladas e monitoradas, a fim de que o produto final gerado seja ideal. O que, no entanto, é observado junto às beneficiadoras de arroz (e geradoras de cinza), é que o que menos importa é a qualidade da cinza produzida, desde que a combustão da casca de arroz gere energia para o processo de beneficiamento do cereal. Sabe-se que, diante de condições de queima controladas com rigor, a cinza da casca do arroz é uma excelente pozolana. Contudo, não há indicadores de que uma cinza residual, gerada com pouco ou nenhum controle da temperatura de queima e das condições de exposição à alta temperatura, não possa representar um material com boas características pozolânicas, podendo ser utilizada como adição ao cimento Portland comum.

Tendo como pano de fundo estes argumentos iniciais e em função dos bons resultados obtidos anteriormente em estudo de caso com cinzas de casca de

arroz residuais (GUEDERT, 1989), esta investigação tem como propósito a realização de um levantamento dos processos de beneficiamento de arroz e, por conseguinte, dos sistemas geradores de cinza, no sul do estado de Santa Catarina, visando a caracterização das cinzas, bem como seu desempenho como pozolana mediante diferentes áreas específicas. Pretende-se, desta forma, estimular o uso da cinza da casca de arroz residual como material pozolânico em adição ao cimento Portland utilizado em concretos e argamassas, indicando procedimentos para caracterização, seleção e uso do material de modo a produzir uma redução de custos na produção de componentes para construção civil e minimizar problemas de poluição ambiental causados pelo não aproveitamento deste resíduo.

O trabalho visa investigar, de uma forma sistemática, a viabilidade do uso do produto na construção civil sob o ponto de vista técnico e estudar técnicas para aprimoramento da produção da pozolana. São objetivos específicos:

- a) Caracterizar os centros de produção e beneficiamento de arroz e processos de queima hoje empregados na geração de energia na região sul de Santa Catarina;
- b) Avaliar as propriedades pozolânicas das cinzas produzidas sob condições de queima (tempo e temperatura) diferentes e a manutenção de suas características ao longo do tempo;
- c) Estudar a influência do grau de moagem (área específica) no desempenho da cinza;
- d) Analisar o desempenho das cinzas em diferentes teores de substituição em concretos e argamassas, comparando-os com o desempenho apresentado pelo uso de pozolanas já consagradas como cinza volante de carvão mineral e sílica ativa.

- e) Estabelecer uma correlação entre a resistência da argamassa e a do concreto confeccionados com cinza de casca de arroz para uso no processo de seleção de uma cinza.

Para tanto, esta dissertação está estruturada em 6 capítulos.

O capítulo 2, versa sobre pozolanas, estabelecendo conceitos, características e propriedades quando de sua adição ao cimento Portland comum.

O capítulo 3 é dedicado a uma revisão bibliográfica sobre o uso da Cinza de Casca de Arroz - CCA - como material pozolânico.

O programa experimental, incluindo as análises química e física dos materiais utilizados na pesquisa, está descrito no capítulo 4.

O capítulo 5 contém os resultados obtidos, bem como sua análise geral, através de fatores calculados a partir dos dados dos ensaios realizados.

Finalmente, no capítulo 6 é realizada uma análise integrada dos dados da pesquisa, sendo indicadas quais cinzas podem ser utilizadas como pozolana para adição ao cimento Portland comum e quais teores propiciam melhor desempenho em relação aos parâmetros estudados.

2. POZOLANAS

2.1 DEFINIÇÕES

Adições minerais são materiais que são adicionados à aglomerantes e/ou concretos e argamassas com eles confeccionados, em quantidades variáveis, geralmente possuindo propriedades cimentantes. Seu emprego se dá de duas maneiras: (i) como adição em teores variáveis em relação à massa de cimento e (ii) como substituição de parte do cimento, visando redução de custos. (SILVEIRA, 1996).

Segundo a NBR 12653 (1992) e a ASTM C 618 (1978), o termo *pozolana* ou *material pozolânico* se aplica àqueles materiais com pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas que, quando finamente divididos e em presença de água, são capazes de reagir com o hidróxido de cálcio liberado durante o processo de hidratação dos minerais - silicatos - que compõem o cimento, combinando-se com ele e fixando-o à temperaturas ordinárias.

A expressão *atividade pozolânica* ou *pozolanicidade*, diz respeito à capacidade de reação do material pozolânico, ou seja, está associada à fixação do hidróxido de cálcio, na forma de compostos hidratados mais ou menos definidos, os quais contribuem para as resistências mecânicas (CINCOTTO, 1988).

2.2 CLASSIFICAÇÃO DAS ADIÇÕES

Fazer uma classificação precisa das pozolanas é difícil, já que atualmente, sob esta denominação encontram-se os mais diversos materiais quanto à origem e composição tanto química quanto mineralógica, que têm um comportamento idêntico ao serem misturados com cal e/ou cimento e água.

A classificação mais comumente aceita está relacionada com a origem. Assim, temos as pozolanas naturais e as pozolanas artificiais (SANTAMARIA, 1983).

As *pozolanas naturais* não necessitam, para seu emprego, tratamentos que levem a modificações químicas e mineralógicas significativas, ou seja, são, por si só, ativas. Podem ser rochas vulcânicas de natureza diversa, ou rochas de origem orgânica, como as terras diatomáceas ou de infusório de caráter fóssil, com composição à base de sílica ativa. Apesar de seu bom comportamento como pozolana o emprego das terras diatomáceas como adição ao cimento tem sido rejeitado, devido à elevada quantidade de água que consomem, o que logicamente, diminui sua resistência mecânica.

As *pozolanas artificiais* resultam de uma transformação química e/ou estrutural de materiais que, originalmente, não apresentam propriedades pozolânicas. Entre elas estão as argilas calcinadas e as cinzas volantes, subprodutos da indústria.

Os minerais da argila, em princípio inertes, apresentam uma atividade pozolânica muito boa quando calcinados a temperaturas entre 600° C e 900° C e moídos à finura do cimento. Por sua origem, as argilas calcinadas são constituídas quase que exclusivamente por sílica e alumina. Seu uso é muito antigo e principalmente utilizado na Índia (CALLEJA, 1983). Entretanto, a

calcinação é um processo de alto custo, o que diminui o seu emprego como pozolana.

As cinzas volantes constituem um tipo de adição ativa em que se destacam duas ações: química (pozolânica) e física (dispersante) além da ação complementar de finos em concretos ou argamassas, quando estes são carentes em finos.

De acordo com MEHTA (1990) é necessário que se faça uma distinção entre adições pozolânicas e cimentantes. As pozolanas naturais, calcinadas ou não, e alguns subprodutos industriais (cinza volante de baixo teor de cálcio) se enquadram no grupo das pozolanas. Quando uma *pozolana* é usada em combinação com o cimento Portland, os componentes do cimento formam hidróxido de cálcio, que reage com a sílica presente na pozolana, formando produtos cimentantes. Contudo, algumas cinzas e escórias contém em sua composição de 10 a 40% de CaO. Caso uma parte deste CaO torne-se disponível para a reação pozolânica, o material torna-se, por si só, cimentante. Desta forma o material não pode ser classificado como uma pozolana, sendo mais apropriado considerá-lo *cimentante e pozolânico*

A norma brasileira NBR 12653 (1992), a exemplo das normas americana (ASTM C 618, 1978), canadense (CSA-A23.4, 1986) e a inglesa (BS 3892, 1993), classificam as pozolanas, em classes, de acordo com sua origem como indica a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Classificação das pozolanas estabelecida pela NBR 12653

NBR 12653	Materiais que obedecem os requisitos
Classe N	Pozolanas naturais, materiais vulcânicos, terras diatomáceas, argilas calcinadas
Classe C	Cinza volante proveniente da queima de carvão betuminoso
Classe E	Os materiais que diferem das classes anteriores e a cinza volante proveniente da queima de carvão sub-betuminoso

2.3 COMPOSIÇÃO

Para que o material seja aceito como pozolana, a norma brasileira NBR 12653 (análoga à americana ASTM C 618), estabelece exigências mínimas quanto à sua composição. As Tabela 2.2 e 2.3 apresentam algumas destas propriedades.

Tabela 2.2 - Propriedades químicas - NBR 12653

Propriedade	NBR 12653		
Classe	N	C	E
SiO ₂ +AL ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (% mínimo)	70,0	70,0	50,0
SO ₃ (% máximo)	4,0	5,0	5,0
Teor de umidade (% máximo)	3,0	3,0	3,0
Perda ao fogo (% máximo)	10,0	6,0	6,0
Álcalis disponível em Na ₂ O (% máximo)	1,5	1,5	1,5

Tabela 2.3 - Propriedades físicas - NBR 12653

Propriedade	NBR 12653		
Classe	N	C	E
Material retido na peneira # 45 μ m (% máximo)	34	34	34
Índice de atividade pozolânica:			
com cimento (28 dias-% em relação ao controle)*	75	75	75
com cal (7 dias, MPa)**	5,5	5,5	5,5

* Vide página 18

** Vide página 17

Cabe ressaltar que, por serem potencialmente importantes como adições minerais, e utilizados em larga escala nos dias atuais, materiais como sílica ativa e cinza de casca de arroz mereceriam uma classificação mais específica e detalhada.

De acordo com SWAMY (1993) e MEHTA e MALHOTRA (1996), há uma necessidade urgente do desenvolvimento de normas que considerem características físicas, químicas e mineralógicas de forma mais abrangente.

Para MEHTA e MALHOTRA (1996), os conteúdos mínimos estabelecidos pela ASTM C 618 (iguais aos da NBR 12653), não estão diretamente relacionados com as propriedades do material, não refletindo de forma clara o seu desempenho no concreto. Estas limitações não necessariamente irão impossibilitar o uso do material como pozolana, uma que vez que as exigências sobre a composição química não têm muito valor prático (LEA, 1971).

Quanto às exigências físicas, há críticas (MEHTA e MALHOTRA, 1996), ao fato de que o índice de atividade pozolânica mínimo exigido pela norma, com

cura acelerada, por 28 dias, seja igual para todas as classes, ignorando os casos de materiais altamente reativos.

SWAMY (1993) enfatiza que, embora seja reconhecida a importância do resíduo a peneira # 45 μ m com relação ao controle de qualidade do material, do índice de atividade pozolânica e da quantidade de água necessária para uma dada trabalhabilidade, existem poucos dados acerca da relação existente entre esses fatores. Talvez uma das razões para especificar finura e índice de pozolanicidade seja o sentimento intuitivo de que ambos estão diretamente ligados com a resistência. Todavia, são a quantidade de sílica amorfa e finura que vão reger a reatividade da pozolana.

Considerando a influência exercida pela composição mineralógica e as características das partículas, na interação cimento adição, MEHTA (1990) sugere uma nova classificação para as adições minerais, selecionando os materiais como cimentantes e pozolânicos, cimentantes, pozolanas altamente reativas, pozolanas comuns, pozolanas pouco reativas. A cinza de casca de arroz, objetivo principal deste estudo, é classificada por MEHTA e MONTEIRO (1994) como uma pozolana altamente reativa, sendo sua composição química e mineralógica sílica pura não cristalina, apresentando partículas geralmente menores que 45 μ m, altamente celulares com área específica de até 60 m²/g.

2.4 O USO DAS POZOLANAS EM ADIÇÃO AO CIMENTO

Numa análise rápida da história da evolução da construção, podemos observar que, sob certos aspectos, ela mostra-se cíclica, com hábitos que vão e vêm através dos tempos. Babilônicos, Gregos e Romanos entre outros povos, utilizaram pozolana como material de construção em épocas e regiões diferentes. Hoje a engenharia vive um novo ciclo no que diz respeito ao uso desse material.

A adição de cinza pozolânica ao Cimento Portland, teve início na Europa na década de 50, como forma de dar um fim nobre às cinzas volantes de carvão mineral, produzidas nas usinas termoeletricas e, em contrapartida, diminuir os custos na produção do cimento.

Cinzas volantes com baixo teor de cálcio (classe F - ASTM C 618) têm estado no mercado há muito tempo, enquanto que cinzas com alto teor de cálcio (classe C - ASTM C 618), sílica ativa e cinza de casca de arroz são produtos relativamente novos. As principais razões para a lenta aceitação desses materiais junto às cimenteiras e concreteiras, é a falta de incentivo econômico, de especificações e do controle da qualidade desses novos produtos. Além disso, a introdução de um novo ingrediente no concreto exigiria das concreteiras um silo adicional para armazenagem e implantação do controle de qualidade do material em questão.

Contudo, este quadro está se modificando progressivamente: leis ambientais severas e a necessidade de economia de energia têm forçado os produtores de cimento e de concreto a encararem as pozolanas como um recurso em potencial e não apenas como um simples resíduo.

O processo de fabricação do cimento Portland requer um alto consumo energético, algo em torno de 4 GJ de energia por tonelada de produto acabado. Diante da carência de energia mundial, um esforço considerável vem sendo feito no sentido de minimizar este consumo com uso de pozolanas como adição ao cimento Portland.

Na busca da economia de energia, os subprodutos industriais e agrícolas vêm sendo uma opção para a indústria do concreto, já que se encontram facilmente disponíveis, exigem pouco ou nenhum beneficiamento, além de apresentarem propriedades cimentantes.

A utilização de adições ao cimento se dá em função de três razões de ordens diversas: tecnológica, econômica e ecológica.

Ordem tecnológica: o cimento Portland comum, em determinados aspectos, apresenta certas deficiências, ou insuficiências, para atender necessidades específicas da indústria da construção civil. O uso das pozolanas pode suprir estas necessidades levando a certas vantagens, sendo os cimentos com adições pozolânicas recomendados por seu uso específico (por exemplo, cimentos pozolânicos para barragens e para obras marítimas). O uso das pozolanas em adição ao cimento confere a concretos e argamassas características como (GUEDERT, 1989):

- a) maior resistência mecânica em idades tardias: melhorando a microestrutura da pasta endurecida de aglomerante ao reagir com $C_a(OH)_2$ produzindo C-S-H, fazendo com que a resistência, com o passar do tempo, tenda a superar a do cimento Portland comum;
- b) menor calor de hidratação: o uso de pozolanas diminui a velocidade inicial de hidratação do cimento, reduzindo a liberação de seu calor de hidratação;
- c) maior trabalhabilidade - devido ao melhor arranjo e maior volume do aglomerante, há um envolvimento mais eficiente dos grãos do agregado;
- d) melhor resistência ao ataque ácido: em função da estabilização do hidróxido de cálcio oriundo da hidratação do clínquer Portland e à formação um C-S-H com menor relação CaO/SiO_2 de menor basicidade;
- e) durabilidade: inibição da reação álcali-agregado e diminuição do diâmetro dos poros da pasta hidratada.

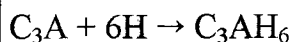
Ordem econômica: a substituição do cimento por pozolana, implica em economia de energia e redução no custo de fabricação do cimento. Isto aumenta o período de exploração das jazidas de calcário e argila e, conseqüentemente, o período de produção da fábrica de cimento. Além disso, há um aumento da capacidade de produção sem necessidade de novos investimento.

Ordem ecológica, já que a utilização de cinzas leves ou pesadas e escórias, provenientes da indústria, diminui a quantidade de resíduo a ser lançado no meio ambiente. O consumo anual de concreto é algo em torno de 7 bilhões de toneladas ou 1,2 bilhões de toneladas de cimento (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Tamanha produção afeta o equilíbrio ambiental de várias formas: exige um alto consumo de energia para atender tal demanda; além de movimentar milhões de m³ de solo para obtenção de matéria prima para sua fabricação.

2.5 A REAÇÃO POZOLÂNICA

O cimento Portland é formado basicamente por quatro componentes anidros: silicato tricálcico (C₃S), silicato bicálcico (C₂S), aluminato tricálcico (C₃A) e ferroaluminato tetracálcico (C₄AF). Reagindo com água por hidrólise, os compostos do cimento dão origem a muitos compostos hidratados, como mostram as reações a seguir (NEVILLE, 1997).

O C₃A nas primeiras horas.



O C₃S, geralmente até os 28 dias



O C_2S a partir dos 28 dias



A grande quantidade de hidróxido de cálcio liberada na hidratação dos silicatos existentes no cimento Portland, vai reagir com a pozolana, quando adicionada, originando compostos estáveis, semelhantes aos formados na hidratação do cimento (silicatos de cálcio hidratados - C-S-H), porém com menor relação CaO/SiO_2 , sendo portanto, produtos de menor basicidade e, assim, mais estáveis quimicamente.

Esta reação é geralmente lenta. Como consequência, tem-se que a taxa de liberação de calor e o desenvolvimento da resistência serão igualmente, lentos. A Figura 2.1 mostra o efeito da substituição de uma pozolana natural italiana sobre o calor de hidratação de um cimento Portland.

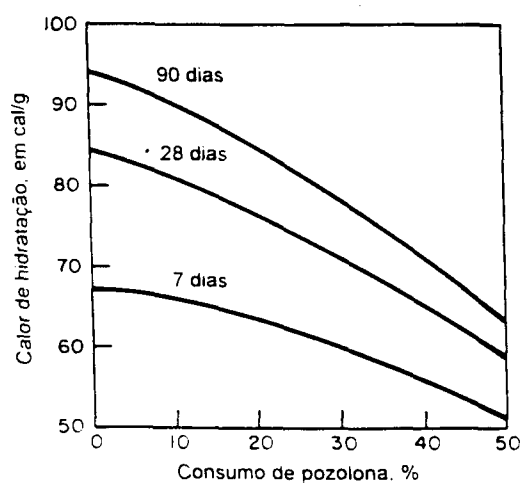


Figura 2.1 - Efeitos de quantidades crescentes de pozolana sobre o calor de hidratação do cimento Portland. (MASSAZZA, apud MEHTA, 1994).

Ao invés de produzir, a reação consome hidróxido de cálcio, o que propicia uma maior durabilidade da pasta endurecida frente a alguns meios ácidos. Além disso, testes realizados com cimento pozolânico e de alto forno com moderada resistência, sobre a distribuição dos tamanhos dos poros, mostraram que os produtos da reação são bastante eficientes no preenchimento dos espaços capilares grandes, melhorando a resistência e a durabilidade do sistema. (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

2.6 MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA

Para SWAMY (1993), os métodos para a avaliação da atividade pozolânica são uma combinação de muitos fatores, que na maioria das vezes, não podem ser totalmente controlados. As características físicas ou mineralógicas do material, a proporção utilizada, aliados a fatores externos como o cimento utilizado, a relação água/materiais cimentantes, a temperatura e as condições de cura, são determinantes no resultado destes testes. Segundo o autor, os requisitos básicos para um método de ensaio seriam: (i) ser hábil para distinguir entre materiais pozolânicos ou não; (ii) fornecer informações sobre o grau de atividade pozolânica da mistura, além de dados sobre o desenvolvimento de resistência da mesma e (iii) permitir a avaliação dos resultados num curto espaço de tempo, para que possam ser utilizados o quanto antes pela indústria da construção.

Todavia, há uma grande diversidade entre os métodos de ensaio mais utilizados. No Brasil, existem normas para avaliação da atividade pozolânica de um material, baseadas na resistência mecânica das misturas ou em ensaios químicos. Uma descrição sucinta destes métodos é feita a seguir.

- a) NBR 5751/77: Materiais pozolânicos - determinação de atividade pozolânica- índice de atividade pozolânica com cal: estabelece uma argamassa de cal no

ração 1:9 em massa, na qual a quantidade de pozolana adicionada (em massa) é dada por: $2 \cdot \text{PHC} \cdot \gamma_{\text{pozolana}} / \gamma_{\text{cal}}$, onde PHC é a quantidade de hidróxido de cálcio utilizado (96 g, para 3 corpos-de-prova). A quantidade de água da mistura é aquela necessária para um índice de consistência *flow table* de (225 ± 5) mm, determinado segundo a NBR 7215/82. São moldados 3 corpos-de-prova, de acordo com a NBR 7215/82 e a cura de dá em duas etapas: nas primeiras 24 horas, nos moldes, à temperatura de $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$ e, em seguida, feita a desforma, por 6 dias, a 55°C . Após este prazo, os corpos-de-prova são resfriados à temperatura ambiente, capeados à quente com enxofre e, logo a seguir, ensaiados à compressão. A pozolanicidade é dada pela média de resistência à compressão, em MPa, dos três exemplares.

- b) NBR 5752/92 Materiais pozolânicos - determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - índice de atividade pozolânica com cimento: prescreve a execução de duas argamassas, sendo a primeira com traço 1:3 (em massa) de cimento e areia normal, ajustando-se a água para um índice de consistência de (225 ± 5) mm (NBR 7215/82); na segunda, 35% do volume de cimento utilizado na primeira argamassa é substituído por pozolana, acrescentando-se água da mesma maneira já descrita para a primeira argamassa, até a o índice de consistência especificado. São moldados 3 corpos-de-prova (seguindo as prescrições da NBR 7215/82) para cada argamassa. Nas primeiras 24 horas, as argamassas são curadas nos moldes e, vencido este prazo, são retiradas dos mesmos e levadas à cura por 27 dias, à temperatura de $(38 \pm 2)^\circ\text{C}$. Os corpos-de-prova são então resfriados à temperatura ambiente, capeados à quente com enxofre e ensaiados à compressão. O IAP (expresso em valores percentuais) é estabelecido pela razão entre a média de resistência à compressão, em MPa, dos 3 corpos-de-prova da argamassa com pozolana e a média da argamassa sem pozolana.
- c) NBR 5753/80 - Método de Fratini (normalizado pelo MB-1154/91): segundo este método, a atividade pozolânica de um determinado material é avaliada

através da comparação da quantidade de hidróxido de cálcio (em milimol CaO/l) presente na fase líquida em contato com o cimento hidratado de uma solução de cimento e água destilada, com a quantidade de hidróxido de cálcio capaz de saturar o meio de mesma alcalinidade. A curva de saturação do hidróxido, em função da alcalinidade, é apresentada na Figura 2.2. Para um cimento pozolânico, a quantidade de hidróxido de cálcio, em função da alcalinidade, deve estar sempre abaixo da curva. Para a avaliação de pozolanas, são feitas misturas em diferentes proporções de cimento e pozolana, analisando-se os resultados de forma semelhante ao que foi descrito anteriormente, avaliando-se se as misturas estudadas comportam-se como cimento pozolânico.

- d) Método Chapelle Modificado/IPT: a pozolanicidade de um material é determinada pela quantidade de cal fixada pela pozolana, através da comparação de uma mistura de pozolana com óxido de cálcio, e outra sem pozolana. As misturas são mantidas à ebulição (90°C), durante 16 horas, em equipamento padronizado para o ensaio e, em seguida, dosada a quantidade de óxido de cálcio que não reagiu. O resultado é expresso em mg CaO/g e, quanto maior o consumo de CaO , maior a pozolanicidade do material.

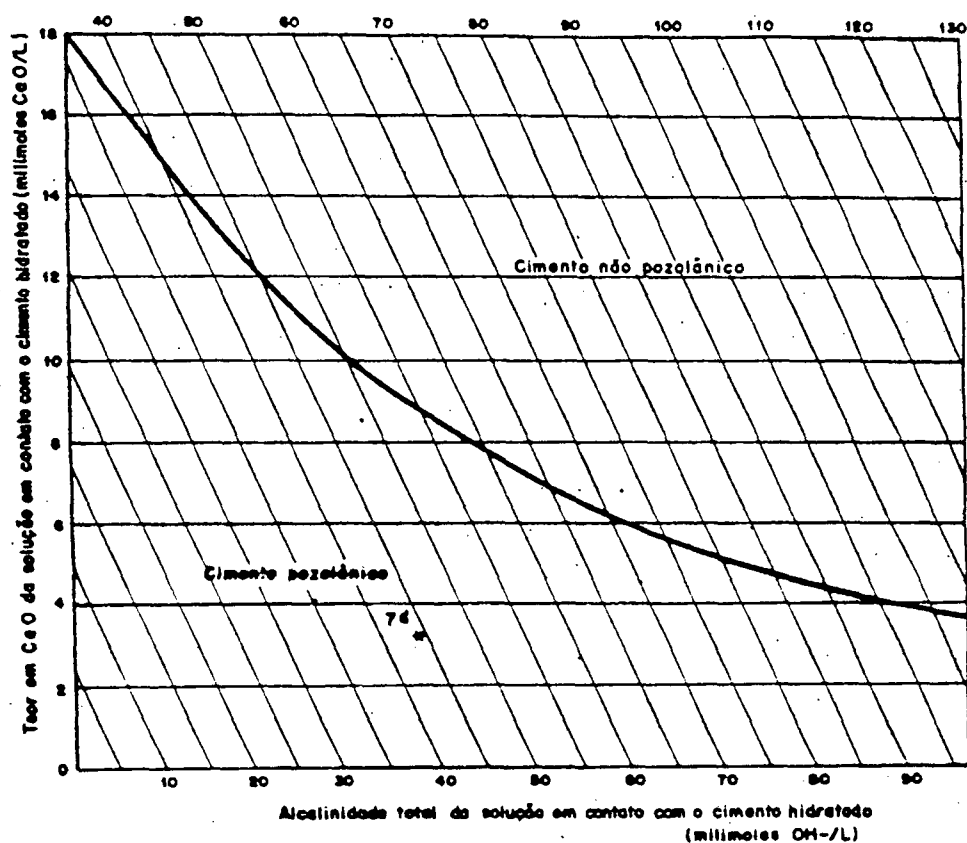


Figura 2.2 - Gráfico do ensaio de pozolanicidade (MB 1154/91)

Outros métodos também utilizados são:

- ASTM C989/87 - C1073/85
- RILEM TC 73-SBC
- LUXAN (1989).

2.7 POZOLANAS QUE SE DESTACAM

Entre as pozolanas estudadas atualmente, a *sílica ativa* (ou comumente chamada *microsílica*) representa um importante papel no desenvolvimento da tecnologia do concreto. A adição de sílica ativa ao concreto de elevado

desempenho, assegura um aumento da resistência à compressão a níveis bastante mais elevados do que aqueles sem adição (GJORV, 1992). A Figura 2.3 evidencia este efeito.

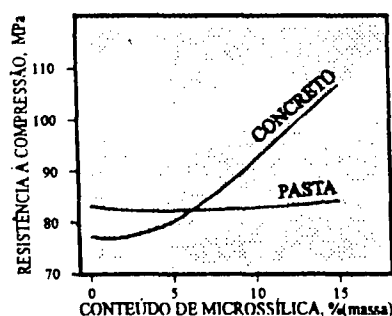


Figura 2.3 - Efeito da sílica ativa na resistência aos 28 dias de pasta e concreto de relação a/c 0,33 (BENTUR, 1989).

Desta forma, a ação física da sílica ativa se traduz por uma pasta mais densa, resultando um concreto com microestrutura mais densa e uniforme. Segundo MEHTA (1986, 1988) citado por ISAIA (1995) o uso de sílica ativa implica num refinamento das dimensões dos poros e diminuição da dimensão dos cristais de CH ao redor das partículas da pozolana. Como resultado deste comportamento, tem-se a densificação da pasta e da interface, melhorando as propriedades do concreto e, de forma especial, daquelas relacionadas com a penetração de líquidos e gases.

Outra pozolana que merece destaque é a *cinza volante*. Sua composição química é variável, porém similar a dos grupos de minerais da argila, dependendo dos carbonos que lhes deram origem, podendo ser razoavelmente constante dentro de uma mesma central termoeletrica, já que procedem de carbonos análogos. Já sua perda ao fogo, vai depender das condições de combustão, que podem variar inclusive dentro da mesma central de queima (CALLEJA, 1983).

De acordo com vários autores, ela apresenta-se menos eficaz que a sílica ativa pelo fato de seus grãos serem maiores que o da sílica ativa e por existir uma

diversidade de composição entre um grão e outro, o que é função do modo de obtenção da cinza. Isto implica numa dispersão entre as fontes de suprimento e até numa mesma fonte, o que não acontece com a sílica ativa.

Esta diversidade de tamanho, morfologia e mineralogia entre as partículas de cinza volante, leva a uma reação diferenciada para cada grão. De acordo com DIAMOND (1989), as reações pozolânicas da cinza volante só levam a um acréscimo de resistência a partir de um mês de idade.

Da mesma forma que a sílica ativa, a cinza volante também melhora o desempenho da microestrutura da interface com o agregado. XU et al. (1993), em pesquisa realizada em argamassas com teores de cinza variando de 0 a 60%, mostram resultados que confirmam a redução do CH proporcionado pelas reações pozolânicas diminuindo sua presença tanto na interface quanto na matriz, tornando-a menos porosa e mais homogênea. Pesquisas recentes mostram a viabilidade de reposição de cimento Portland em teores que variam de 50 a 60% de cinza volante, a fim de obter-se concretos de alto desempenho e elevada qualidade (ISAIA, 1995).

No mundo das pozolanas, a *cinza de casca de arroz*, vem merecendo atenção especial por parte dos pesquisadores. Segundo a opinião da maioria deles, sua reatividade é similar ou até superior à da sílica ativa. Uma vez que o estudo deste material como pozolana é o objetivo principal do presente trabalho, uma revisão sobre suas características e seu emprego na construção civil, é feito no próximo capítulo.

3. CINZA DE CASCA DE ARROZ

3.1 CONSIDERAÇÕES

✓ Através da combustão da casca de arroz, utilizada pela indústria como fonte de energia calorífica para o processo de beneficiamento do cereal, surge a cinza de casca de arroz.

✓ No Brasil, como já foi dito anteriormente, o estado do Rio Grande do Sul é o maior produtor nacional. Com uma estimativa de safra em 96 de 10.035,402 toneladas, segundo dados do IBGE (1996), e considerando-se que 4% do peso do arroz em casca é transformado em cinza durante o processo de combustão, pode-se afirmar que 401.416,08 toneladas do resíduo foram geradas, na safra 96, apenas no Brasil.

✓ O estado de Santa Catarina, beneficia cerca de 742.619,75 toneladas de arroz, gerando 29.704,78 toneladas de cinza, que lançada em aterros ou ao longo de estradas vicinais (Figura 3.1), atinge os mananciais de água, gerando graves problemas de poluição.



Figura 3.1 - Depósito de cinza de casca de arroz ao longo de estradas vicinais

↳ Diante disto, o não aproveitamento deste material não pode mais ser aceito pela sociedade atual. Assim, muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos, com o intuito de utilizar este produto em diversos setores industriais e, de maneira especial, na indústria da construção civil. Em trabalho publicado em 1972, HUSTON faz uma listagem de 262 referências bibliográficas sobre as possibilidades de emprego da cinza de casca de arroz.↵

No Brasil, merecem destaque os trabalhos sobre cinza de casca de arroz desenvolvidos por CINCOTTO (1988), GUEDERT (1989), FARIAS e RECENA (1990), ISAIA (1995), SILVEIRA (1996). A Figura 3.2 apresenta as potencialidades deste produto.

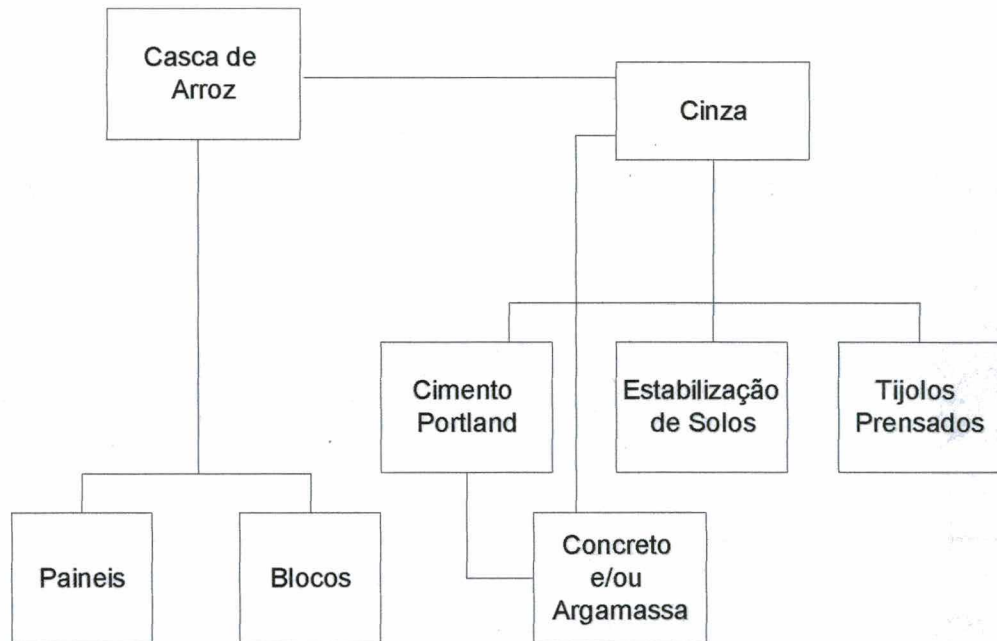


Figura 3.2 - Organograma de aplicações da cinza de casca de arroz (SILVA, 1994).

3.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS

^ A casca de arroz é uma capa lenhosa do grão, dura, com alto teor de sílica (MEHTA, 1992), composta por 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica de base anidra. Quando queimada, a lignina e a celulose podem ser removidas, resultando uma estrutura celular e porosa, [de acordo com a Figura 3.3.]

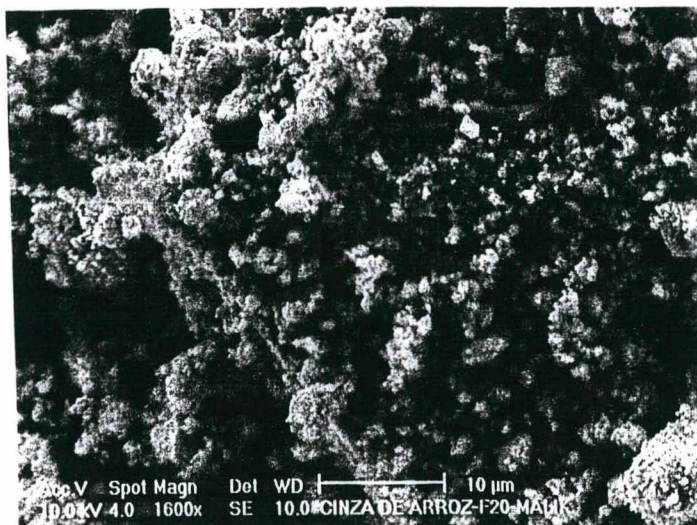


Figura 3.3 - Micrografia eletrônica de varredura da cinza de casca de arroz queimada a 560°C (SILVEIRA e RUARO, 1995)

⌞ Queimada parcialmente, a casca de arroz gera uma cinza com certo teor de carbono e, por isso, possui cor preta. Quando inteiramente queimada, resulta numa cinza de cor acinzentada, branca ou púrpura, dependendo das impurezas presentes e das condições de queima. [Para BOATENG e SKEETE (1990), temperaturas elevadas e longo tempo de exposição geram cinzas branco-rosadas, o que indica a presença de sílica nas suas formas cristalinas: cristobalita e tridimita.]

⌞ Estudos experimentais realizados na Universidade da Califórnia, mostram que quando a temperatura de queima da casca de arroz é baixa e o tempo de exposição a alta temperatura é pequeno, a sílica contida na cinza é amorfa. A cinza nestas condições apresenta alta porosidade interna e área específica de 50 a 110 m²/g por adsorção de nitrogênio (MEHTA, 1992). As cinzas apresentam boa atividade pozolânica, sendo consideradas um excelente material para uso como adição em cimento Portland.

⌞ A densidade da cinza é variável, sendo função do aumento ou diminuição da temperatura de queima.

3.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Segundo análise feita por HUSTON (1972), em cinzas provenientes de diversos países, produzidas pela queima total da casca, o teor de sílica da cinza varia de 90 a 95% nas amostras estudadas. As principais impurezas presentes são os álcalis, K_2O e Na_2O . O teor de K_2O encontra-se entre 1 e 5%, dependendo da quantidade de fertilizante usado na plantação de arroz. Pequenas quantidades (inferiores a 1%) de outras impurezas como CaO , MgO , e P_2O_5 também foram encontradas.

Materiais que contenham sílica na forma não cristalina não representam risco à saúde. Caso a temperatura de queima da casca seja muito alta, a sílica amorfa presente na cinza passa para suas formas cristalinas, tridimita e cristobalita. A cinza que contém sílica sob a forma cristalina é menos reativa e é considerada prejudicial à saúde humana (MEHTA, 1992).

3.4 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE QUEIMA E DO GRAU DE MOAGEM

Um dos fatores limitantes do uso da cinza da casca de arroz, é o controle da temperatura de queima, que governa o teor de sílica amorfa e, conseqüentemente, a atividade pozolânica. Porém, cada pesquisa indica um tempo e uma temperatura de queima para as condições de trabalho impostas no momento de seu desenvolvimento (equipamentos disponíveis, condições de ensaio).

De acordo com a bibliografia (SILVEIRA, 1996), até a década de 70 o uso da cinza de casca de arroz limitava-se à confecção de blocos. Aparentemente até aquela data nenhuma atenção foi dada ao controle das condições de queima da casca de arroz, no sentido de obter-se uma cinza pozolânica de boa qualidade.

Em 1973, MEHTA publica o primeiro trabalho descrevendo um cuidadoso estudo sobre os efeitos do processo de queima sobre a atividade pozolânica da cinza de casca do arroz. Em 1974, através de um processo idealizado para controle das condições de queima da casca de arroz denominado “leito fluidizado”, pesquisadores obtiveram uma cinza que, utilizada em substituição ao cimento nos teores de 30, 50 e 70%, não só produziram um concreto com resistências elevadas, mas também altamente resistente ao ataque de ácidos (PITT, 1976). Na mesma década, pesquisadores relataram a diminuição da expansão na reação álcali-agregado, no concreto, pela adição de cinza de casca de arroz obtida através de queima controlada (MEHTA e POLIVKA, 1976). Segundo este estudo, com os ensaios realizados de acordo com a ASTM C 441, foram necessários 25% de argila calcinada para obter uma redução na reação de 90%, enquanto que, com o uso de cinza de casca de arroz, foram necessários apenas 10% para obter o mesmo grau de eficiência.

A influência da temperatura de queima na cristalinidade da sílica, ficou evidenciada com os resultados obtidos por MEHTA e PITT (1977). Através da queima em forno com temperatura controlada (inferiores a 550° C), os autores obtiveram uma cinza altamente reativa.

Em 1981, NIMITYONGSKUL et al. realizaram uma análise relacionando a temperatura de queima, que variou entre 200 e 1000° C, e a resistência à compressão de corpos-de-prova de argamassa, concluindo que a reatividade da cinza foi consideravelmente influenciada pela temperatura de queima, tendo sido obtidas cinzas de boa qualidade (melhores resistências das argamassas) para temperaturas entre 300 e 800° C. A temperatura em que a sílica resultante passou para sua fase cristalina, ocorreu entre 800 e 1000° C, tendo sido indicada como temperatura de queima ideal, 400° C. Segundo os referidos autores, o resfriamento brusco da cinza propicia melhor resistência aos 3 e 7 dias, sendo que aos 28 dias as resistências independem do método de resfriamento da cinza. Outra conclusão importante, é que as cinzas produzidas a céu aberto, sem

controle da temperatura de queima e do tempo de exposição, também apresentaram sílica reativa.

SALLAS (1986), realizou experiências com cinzas queimadas em condições controladas com uma temperatura máxima de 1000° C. O autor afirma que a casca de arroz queimada a 850° C, durante duas horas, propicia o aparecimento de sílica de base cristalina de quartzo e que a sílica permanece em estado amorfo quando as temperaturas se mantêm entre 450 e 700° C, durante 3 ou 4 horas.

De acordo com SMITH (1984), a prática semi-industrial na Índia, Nepal e Paquistão, limita a temperatura de queima em 700° C.

ÖLMEZ e HEREN (1986) declaram que a cinza de casca de arroz queimada a 700° C, por 5 minutos, possui ótima atividade pozolânica, tendo a pasta do concreto feito com adição desta cinza apresentado uma resistência ao ataque ácido, superior à pasta de cimento Portland comum.

HUANG e WU (1989) apresentam bons resultados quanto às propriedades mecânicas e físicas de pastas e argamassas de cimento contendo cinza de casca de arroz queimada em temperaturas entre 400° C e 1200° C. Já BOATENG e SKEETE (1990), concluem que a cinza apresente-se amorfa e reativa, quando a temperatura de queima encontra-se entre 800° C e 900° C.

Em pesquisa recente, SUGITA et al. (1993) relatam que a maior atividade pozolânica ocorre para temperaturas de queima entre 500° C e 600° C, por tempo inferior a 60 minutos. Sob estas condições, a atividade pozolânica foi semelhante à da sílica ativa e as propriedades obtidas em argamassas com até 15% de substituição de cinza de casca de arroz mostraram boa resistências a ataque ácido, à ação gelo-degelo e menor profundidade de carbonatação.

CINCOTTO et al. (1990), obtiveram bons resultados nas propriedades mecânicas de argamassas quando da substituição de até 50% de cimento Portland por cinza de casca de arroz queimada em leito fluidizado.

Para GUEDERT (1989), mesmo sendo produzida sem controle rigoroso das condições de queima, a casca de arroz pode gerar uma cinza com propriedades pozolânicas. Já MEHTA (1992), enfatiza que a cinza da casca de arroz, queimada a temperatura controlada é altamente reativa, podendo ser chamada de *superpozolana*, uma vez que aumenta a resistência mecânica do concreto nas idades iniciais de 1 e 3 dias, com características pozolânicas adequadas à produção de cimento pozolânico.

Outro fator importante no uso da cinza é seu grau de moagem. Em termos de características físicas, as mais importantes são as relacionadas com a finura, em todas as suas manifestações e expressões, já que frações granulométricas diferentes, se comportam de maneira diferente (CALLEJA, 1983).

A finura, a densidade da cinza e a forma da partícula influenciam diretamente a relação água/(cimento+cinza) e na retenção de água pelo concreto. O aumento da finura da cinza de casca de arroz melhora a trabalhabilidade, a retenção de água e a incorporação de areia na argamassa (FARIAS e RECENA, 1990).

Entretanto, o grau de moagem além de estar diretamente ligado ao tipo e às características de cada moinho parece sofrer influência significativa da temperatura de queima. AL-KHALAF e YOUSIFT (1984), realizaram estudo onde a temperatura de queima variou de 450 a 700° C, com tempo de exposição a estas temperaturas fixo em 2 horas. O estudo revelou que a finura da cinza aumentou com o aumento do tempo de moagem e diminuiu com a temperatura de queima cujos valores máximo corresponderam às temperaturas de 450 e 500° C, como mostra a Figura 3.4.

Através da medida da área específica, GUEDERT (1989) avaliou a eficiência do processo de moagem, realizado em moinho de bolas, para cinza queimada sem controle de temperatura. Os resultados evidenciaram o aumento da área específica com ao aumento do tempo de moagem estabelecidos em 1, 2, 4, e 8 horas e um melhor desempenho da cinza (maior pozolanicidade) para o maior tempo de moagem.

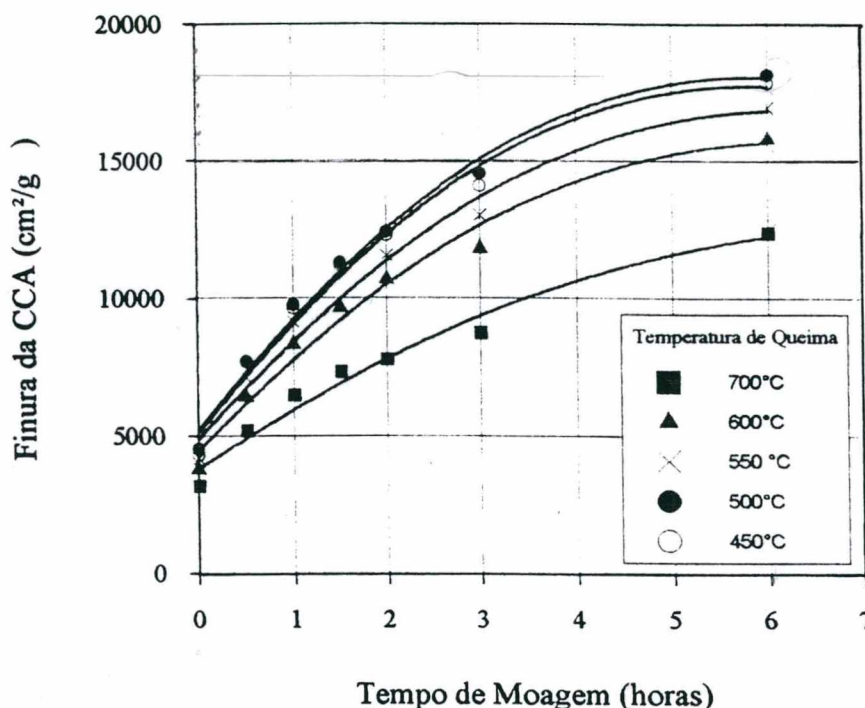


Figura 3.4 - Relação entre tempo de moagem e temperatura de queima da cinza de casca de arroz, queimada a várias temperaturas, por 2 horas (AL-KHALAF e YOUSIFT, 1984)

FARIAS e RECENA (1990) também utilizaram a medida da área específica para avaliação do tempo de moagem. Utilizando moinho de anéis para moagem de cinza de casca de arroz em intervalos de 3 a 70 minutos, obtiveram o maior valor para o intervalo de 30 minutos ($19,75\text{m}^2/\text{g}$). Para tempos superiores a este, houve uma diminuição da área específica.

Análise realizada por SILVEIRA e RUARO (1995), em cinzas provenientes de diferentes processos de queima constatou que, embora submetidas ao mesmo tempo de moagem (1 hora e 30 minutos) em moinho de bolas, as cinzas queimadas a 560° C e 800° C apresentaram diâmetro médio e área específica diferentes. A primeira apresentou diâmetro médio menor e área específica maior em relação à segunda. Este fato, já evidenciado por AL-KHALAF e YOUSIFT (1984), pode ser explicado analisando-se o teor de carbono. Segundo CINCOTTO et al. (1990), as cinzas queimadas a baixas temperaturas (inferiores a 800° C), contém alto teor de carbono, o que pode ser a razão de altas áreas específicas,

A cinza produzida na região de Criciúma, sul do estado de Santa Catarina, e objeto do presente trabalho, é produzida por sistemas de queima diferentes, o que implica em temperaturas de queima diferentes. Todavia, mesmo as cinzas produzidas por sistemas artesanais, podem apresentar boas características pozolânicas (GUEDERT, 1989).

3.5 A REAÇÃO POZOLÂNICA DA CINZA DE CASCA DE ARROZ

Estabelecer uma correlação entre a atividade pozolânica com cimento e/ou cal e o desempenho de uma pozolana quando de sua adição a concretos e argamassas, tem sido motivo de grandes questionamentos no meio técnico (SWAMY, 1993; ISAIA, 1995; MEHTA e MALHOTRA, 1996).

Quando se tem um produto potencialmente ativo, é essencial a determinação de sua atividade pozolânica. Todavia, não existe uma uniformidade nas normas que prescrevem os ensaios para este fim. Em geral, os métodos ou se baseiam na resistência mecânica de uma mistura de cimento ou cal, pozolana,

agregado miúdo e água ou ensaios químicos, analisando a quantidade de hidróxido de cálcio que o material consegue fixar (vide páginas 17 e 18).

SWAMY (1993), enfatiza que os métodos referem-se ao desenvolvimento de resistência no compósito cimento/pozolana, em níveis de substituição, idade e método de cura diferentes, criando uma grande confusão sobre o resultado final. Para o autor, a recomendação feita pela RILEM TC 73-SBC, é altamente válida e apropriada, merecendo destaque os seguintes pontos: (1) o volume total de material cimentante na argamassa de controle e naquela em teste deve ser mantido igual e (2) a relação água/cimento deve ser constante e a consistência das argamassas deve ser ajustada com a incorporação de agregado miúdo.

Segundo diversos autores (COOK, 1986; JAMES E RAO, 1986; SUGITA et al., 1992), quando se trata da cinza de casca de arroz, são fatores influentes no desenvolvimento da atividade pozolânica as condições de queima da casca para obtenção da cinza, a finura e o teor de sílica amorfa do material.

A Figura 3.5 mostra o trabalho desenvolvido por JAMES e RAO (1986), avaliando a reatividade com a cal de cinzas com diferentes propriedades físico-químicas, tratadas a diferentes temperaturas de queima e tempos de moagem. Como pode ser observado, a temperatura de queima é altamente significativa no desenvolvimento da reatividade do material e o fator tempo de moagem não exerceu grande influência sobre este parâmetro.

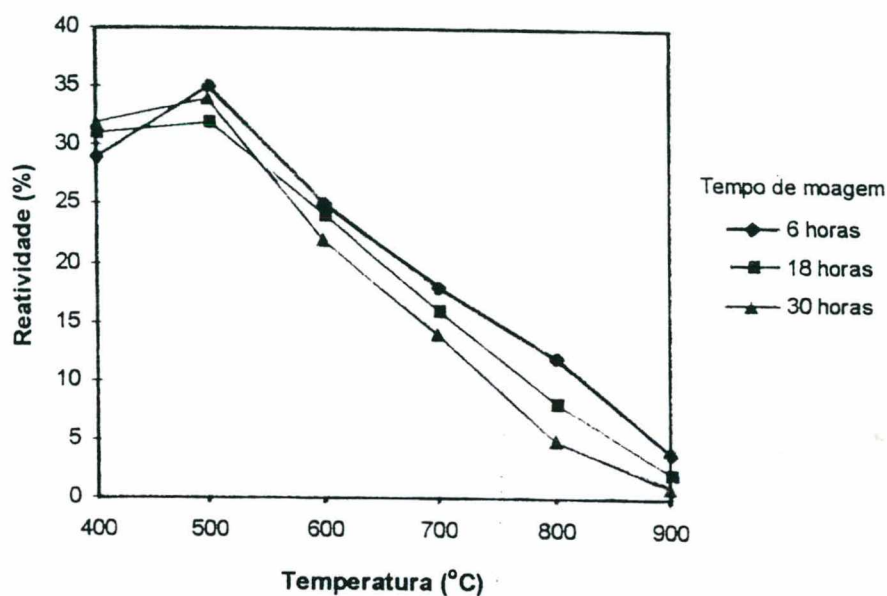


Figura 3.5 - Reatividade com a cal, da cinza de casca de arroz produzida a diferentes temperaturas e tempos de moagem (JAMES e RAO, 1986).

Utilizando o método de avaliação da atividade pozolânica através da condutividade elétrica, LUXAN (1989), SUGITA et al. (1992) constataram a influência exercida pela temperatura de queima na atividade pozolânica da cinza de casca de arroz. Com amostras queimadas a 400, 500, 600, 700 e 800° C, foram obtidos os melhores resultados com aquelas queimadas a temperaturas inferiores a 600° C.

As cinzas, em especial a cinza de casca de arroz, por sua composição, constituição e proporção em cimentos para argamassas e concretos, podem influenciar em tudo: no desenvolvimento da resistência, na exigência e retenção de água, na retração, na fissuração e fluência do concreto influem também na durabilidade de concretos e argamassas frente ao ataque de agentes químicos, particularmente, sobre o aspecto corrosão da armadura. A pozolanicidade do material deve considerar fatores ligados à composição química, física e

química, física e mineralógica. Em relação a esta pozolana, atenção especial deve ser atribuída ao processo de queima, temperatura e tempo de exposição, além do tempo de moagem. Uma vez estes problemas resolvidos, a cinza de casca de arroz poderia ser utilizada, com inquestionáveis vantagens econômicas, em fábricas de artefatos e pré-moldados de argamassa e concreto, em centrais de produção de concreto para fabricação de concretos especiais como os de alto desempenho, com baixo calor de hidratação ou resistente ao ataque de sulfatos.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 DESENVOLVIMENTO

Com o intuito de alcançar os objetivos descritos no capítulo 1, foi definido o seguinte programa experimental:

- a) Levantamento dos centros de produção e beneficiamento de arroz nos municípios de Tubarão, Morro da Fumaça, Criciúma, Nova Veneza e Forquilha (sul do Estado de Santa Catarina) e, conseqüentemente, dos processos de queima da casca empregados na geração de energia calorífica;
- b) Avaliação das propriedades pozolânicas das diferentes cinzas produzidas nos municípios acima citados e a manutenção dessas propriedades ao longo do tempo, analisando o desempenho de suas propriedades em argamassas;
- c) Comparação da evolução de resistência de concretos confeccionados com uma das cinzas, com concretos confeccionados com sílica ativa e cinza volante de carvão mineral.
- d) Correlacionar o desempenho das argamassas e dos concretos produzidos com CCA residual.

4.2 LEVANTAMENTO DOS CENTROS PRODUTORES DE CCA

Para a avaliação da influência do processo de queima na pozolanicidade da CCA residual, decidiu-se fazer um levantamento dos diferentes sistemas de produção da cinza em beneficiadoras situadas no sul do estado de Santa Catarina. Foram identificados cinco processos, o que significa cinco tipos de cinza diferentes, como mostra a Tabela 4.1

Tabela 4.1 - Sistemas de produção de CCA em Santa Catarina

Indústria	Sistema de Produção	Cinza Produzida
C	industrializado	via úmida
F	industrializado	via seca
G	artesanal	via úmida
P	semi-industrializado	via seca
R	semi-industrilizado	via úmida

No processo artesanal, a cinza é gerada pelo sistema de grelhas (Figura 4.1). A casca é queimada sem controle da temperatura, em grelhas dispostas paralelamente, sendo a cinza coletada no final da grelha e normalmente transportada por água (cinza via úmida), até um depósito intermediário. Depois de acumulado um certo volume neste depósito a cinza é transferida para um depósito definitivo, segundo determinação da FATMA.

Numa forma semi-industrial de queima da casca de arroz (Figura 4.2), o ar é injetado através de dutos metálicos para o interior de um cilindro onde a casca cai e é incinerada. A cinza resultante é recolhida através de canais de água, ou via seca, através de pás, à medida que vai sendo produzida.

Já na forma automatizada (Figura 4.3) de geração de calor através da queima da casca de arroz, existe não o controle da temperatura de queima, mas da pressão de vapor gerada em função desta queima. Quando as caldeiras do

processo de beneficiamento de arroz necessitam de mais pressão a quantidade de casca liberada para queima é maior e vice-versa. Neste processo, a cinza pode ser recolhida via úmida, através de canais de água corrente, onde ela cai e é transportada, ou pode ser recolhida por ciclones, via seca, e depositada em silos de armazenamento.



Figura 4.1 - Queima da casca de arroz pelo sistema artesanal - tipo grelha

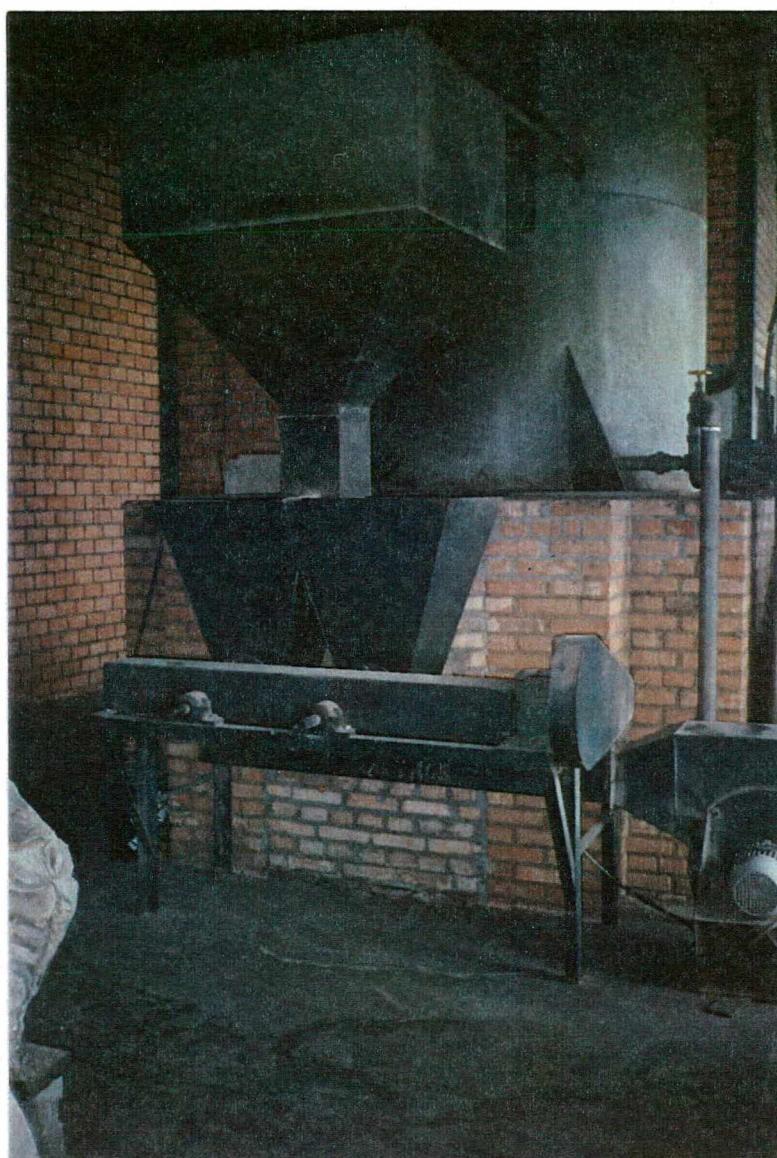


Figura 4.2 - Queima da casca de arroz pelo sistema semi-industrial

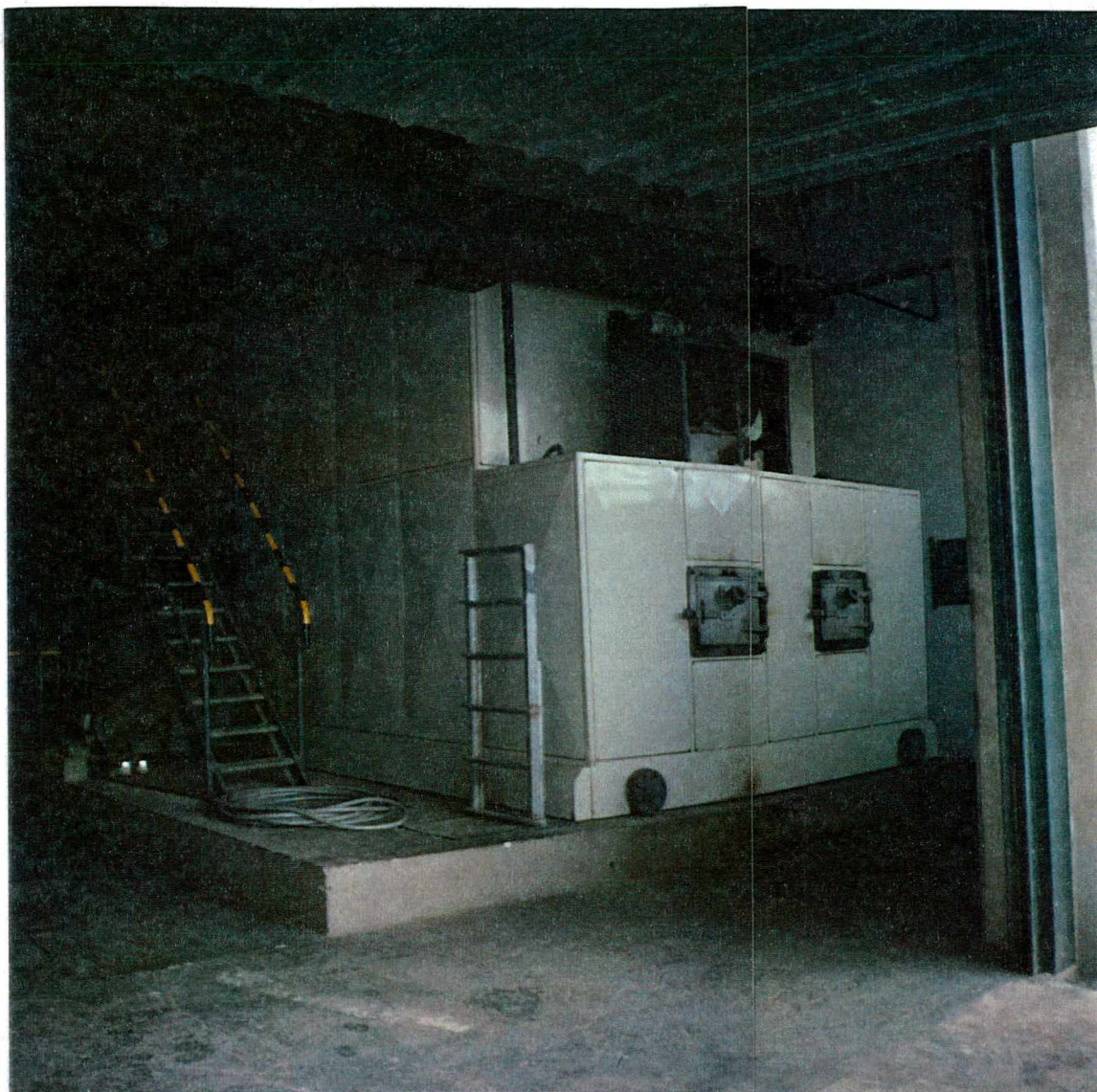


Figura 4.3 - Queima da casca de arroz pelo sistema industrializado

Uma vez detectados os diferentes sistemas de produção da CCA, foi estabelecido um cronograma de coleta de amostras, onde foram definidas 3 coletas para cada cinza, feitas de forma aleatória. A coleta das amostras deu-se nos meses de março, agosto e setembro de 1.996. A aleatoriedade na coleta das amostras, serviu para a avaliação das propriedades pozolânicas do material ao longo do tempo.

Embora tenha sido um dos processos de beneficiamento de arroz detectados nesta fase da pesquisa, a cinza da indústria C não foi avaliada no decorrer dos trabalhos. A indústria passou a queimar, juntamente com a casca de arroz, o que convencionou em chamar de “cepilhos” que nada mais são do que pequenas lascas de madeira. Isto descaracterizou o produto final, ou seja, a cinza produzida era uma mistura de cinza de casca de arroz e cinza de madeira, fazendo com este processo fosse desprezado no desenvolvimento da pesquisa.

Tendo em vista a diversidade existente entre os processos de beneficiamento do arroz e, por conseguinte, da geração de cinza, foi estabelecido um estudo preliminar, denominado *programa piloto* (PRUDÊNCIO e SANTOS, 1996), a fim de reduzir o número de experimentos em relação ao necessário para um projeto fatorial. Este programa teve como objetivos: (i) estabelecer um tempo de moagem ideal para a CCA, ou seja, uma área específica que levasse ao melhor índice de atividade pozolânica com cimento e, teoricamente, ao melhor desempenho no tocante à resistência de concretos e argamassas e (ii) determinação do melhor teor de substituição de cimento por cinza de casca de arroz quando se almeja maior economia, isto é, teor máximo de substituição para resistências usuais; ou quando o objetivo for ganho de resistência, ou seja, teor ideal para um máximo de resistência aos 28 dias.

Para o desenvolvimento desse programa, foi escolhida a cinza da indústria F. A escolha se deu pela maior disponibilidade da cinza, e por ser ela produzida

por um sistema industrializado, o que, teoricamente, significaria uma cinza com melhores características pozolânicas, já que as condições de queima da casca são, embora que parcialmente, controladas.

4.3 PROGRAMA PILOTO

4.3.1 Moagem

A moagem da cinza escolhida foi executada à seco, em moinho de bolas, com revestimento interno e carga de alumina, volume de 175,00 l e velocidade de giro de 44 rpm. A quantidade de amostra moída de cada vez era cerca de 11,00 kg. A Figura 4.4 mostra o moinho utilizado.



Figura 4.4 - Moinho giratório, com revestimento interno e carga de alumina, empregado na moagem a CCA

Os tempos de moagem estabelecidos foram 15 e 30 minutos, 1, 2, 4, 6, 8, 10, e 20 horas, cujas áreas específicas encontram-se na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Área específica referente aos tempos de moagem da CCA do programa piloto

Tempo de moagem	Área específica Blaine (m²/kg)
15 minutos	827
30 minutos	1087
1 hora	1376
2 horas	1604
4 horas	1614
6 horas	1772
8 horas	2275
10 horas	2589
20 horas	2899

4.3.2 Pozolanicidade com cimento

O ensaio de pozolanicidade com cimento foi realizado com amostra da cinza F em seus diferentes tempos de moagem. Seguindo o que recomenda a NBR 5752/92 e utilizando cimento CP-I-S-32 (Tabela 4.3), foram confeccionadas duas argamassas: a primeira (denominada argamassa de controle), com traço 1:3 (em massa) e água suficiente para uma trabalhabilidade variando de 220 a 230 mm (*flow test*); a segunda, com 35% do volume absoluto de cimento da argamassa de controle substituído por cinza de casca de arroz e mesmas condições de trabalhabilidade. Para cada argamassa moldou-se três corpos-de-prova que foram curados as primeiras 24 horas nos moldes e, feita a desforma após este período, a cura se deu em recipiente hermeticamente fechado, a uma temperatura de $(38 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, durante 27 dias. Após este período os corpos-de-prova foram ensaiados à compressão axial. O índice de atividade pozolânica com cimento, que é a razão entre a resistência média da argamassa com cinza e a resistência média da argamassa de controle, em percentual, aos 28 dias, foi

determinado para cada tempo de moagem. O resultado deste ensaio é mostrado na Tabela 4.4.

Tabela 4.3 - Caracterização do cimento

Análise Física		Análise Química		Análise Mecânica	
ensaio	teor	ensaio	teor	idade (dias)	Resistência (MPa)
peneira # 0,075 mm	1,80%	perda ao fogo	2,89%	1	15,5
peneira # 0,045 mm	12,30%	SiO ₂	18,74 %	3	30,7
água da pasta de consistência normal	26,10%	Al ₂ O ₃	4,63%	7	36,3
massa específica (g/cm ³)	3,15	Fe ₂ O ₃	3,49%	28	45,2
Blaine (m ² /kg)	341	CaO	59,46 %		
início de pega (min)	255	MgO	5,43%		
fim de pega (min)	350	K ₂ O	0,53%		
		Na ₂ O	0,05%		
		SO ₃	2,63%		
		resíduo insolúvel	0,77%		

Tabela 4.4 - Índice de atividade pozolânica

Argamassa	Cimento (g)	Areia (g)	Cinza (g)	Água (g)	Flow test (mm)	Resistência (MPa)	IAP (%)
controle	312,00	936,0	0,00	162,22	224	33,10	-
15 min	202,80	936,0	70,72	200,97	222	20,40	62*
30 min	202,80	936,0	70,72	190,45	225	27,37	83
1 hora	202,80	936,0	70,72	181,26	220	35,08	106
2 horas	202,80	936,0	70,72	179,19	223	37,50	113
4 horas	202,80	936,0	70,72	177,74	226	41,63	126
6 horas	202,80	936,0	70,72	176,64	220	40,87	123
8 horas	202,80	936,0	70,72	174,20	220	39,53	119
10 horas	202,80	936,0	70,72	178,05	222	39,02	118
20 horas	202,80	936,0	70,72	175,01	226	38,13	115

(*) Valor fora do mínimo exigido pela NBR 12653, que é 75%.

4.3.3 Resistência

Os resultados do ensaio de pozolanicidade com cimento mostraram que para a cinza testada o tempo ideal de moagem seria 4 horas. Este tempo foi então escolhido para determinação da resistência à compressão, com procedimentos de ensaio baseados na NBR 7215/82. Foram utilizados sete teores de substituição de cimento por cinza de casca de arroz, em volume absoluto, de modo a manter o mesmo volume de aglomerante na pasta. A relação água/(cimento+pozolana) foi fixada, em volume absoluto, em 1,638. Como é usual referir-se à relação água/aglomerante em massa, resolveu-se denominar de “relação a/cp em massa equivalente” a razão entre a massa de água e a massa de aglomerante, transformando-se a massa de pozolana adicionada em massa equivalente de cimento ao multiplicá-la por $\gamma_{\text{cimento}}/\gamma_{\text{pozolana}}$. Assim sendo, neste caso, a relação a/cp, em massa equivalente foi, para todas as argamassas de 0,52. A trabalhabilidade da argamassa foi fixada em (225 ± 5) mm (índice de consistência normal, estabelecido pela NBR 5752/92 e determinado segundo a

NBR 7215/82) e ajustada através da incorporação diferenciada de areia, segundo recomendações da RILEM TC 73 SBC. Foram moldados 6 corpos-de-prova por vez, totalizando 12 para cada argamassa, ensaiando-se 3 para cada idade (3, 7, 28, 90 dias). Os materiais foram colocados no misturador mecânico obedecendo a seguinte ordem:

- 100% da água
- 100% da pozolana
- 100% do cimento
- 70% do agregado miúdo utilizado na argamassa de controle

Após a mistura dessa quantidade de material, era executado o ensaio de consistência *flow table* (Figura 4.5). Quando o índice de consistência apresentava-se acima do limite estabelecido, a argamassa era recolocada no misturador, sendo feito o acréscimo de areia. Nova mistura e medida de índice de consistência eram realizadas. Caso o índice de consistência fosse alcançado, os corpos-de-prova eram moldados segundo as especificações da NBR 7215/82, em caso contrário, nova argamassa era confeccionada, sendo que desta vez, a quantidade de agregado adicionada para a mistura inicial era calculada com base no índice de consistência obtido na segunda tentativa da argamassa anterior.

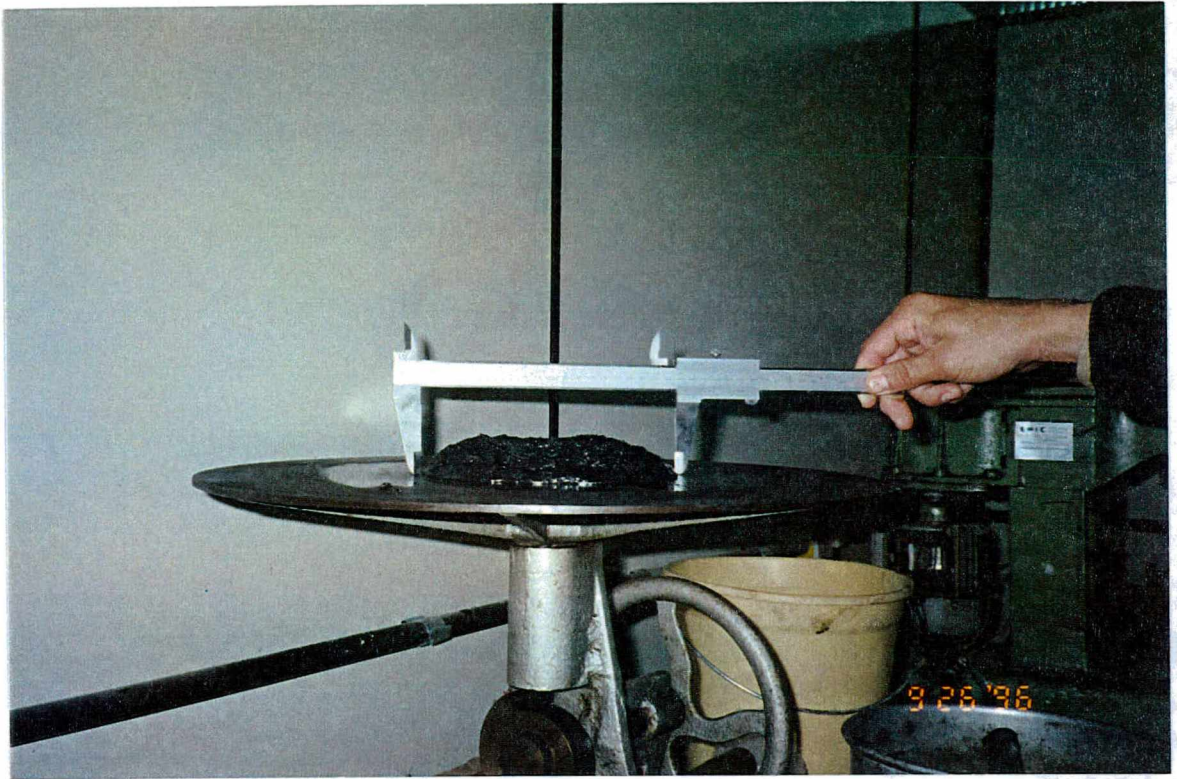


Figura 4.5 Detalhe do ensaio de consistência *flow table*

Após a moldagem, os corpos-de-prova eram colocados em sacos plásticos que, depois de fechados e devidamente etiquetados, ficavam as primeiras 24 horas dentro de uma caixa de isopor fechada. Passadas as 24 horas, procedia-se a desforma e os corpos-de-prova eram imersos numa solução de água saturada em hidróxido de cálcio para a cura, com temperatura controlada em $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$. Vencido o prazo para o ensaio (3, 7, 28 ou 90 dias), retirava-se os corpos-de-prova da água com 1 hora de antecedência, procedia-se o capeamento com enxofre (segundo NBR 7215/82) e, em seguida, realizava-se o ensaio de compressão. Os resultados são mostrados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Resistência aos 28 dias

Teor de cinza	0	5%	10%	15%	20%	30%	40%	50%
<i>flow test</i> (mm)	224,0	224,0	220,	226,0	228,0	225,0	226,0	230,0
resistência (MPa)	37,68	39,09	42,4	45,33	40,87	39,72	38,2	35,40

4.3.4 Análise dos resultados

A Figura 4.6 mostra uma diminuição na demanda de água de amassamento apesar do aumento do tempo de moagem (aumento da área específica). Tal fato pode ser atribuído à forma esponjosa da partícula da cinza: quanto menor o grão, menor a capacidade de reter a água.

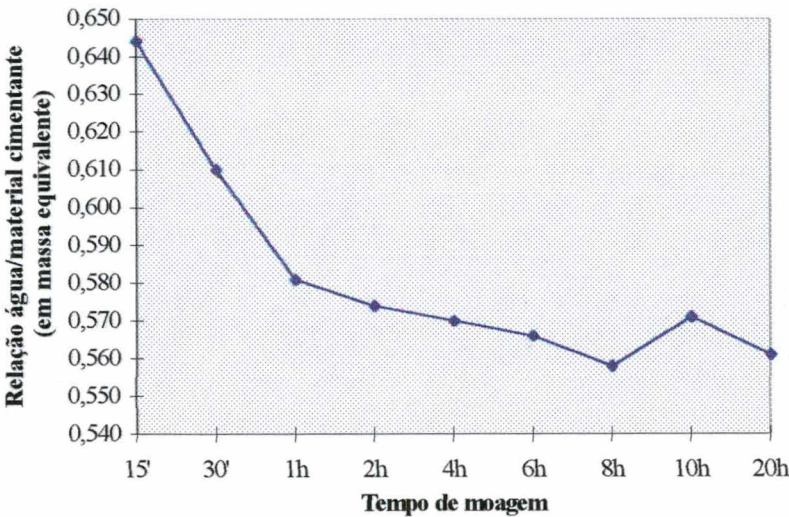
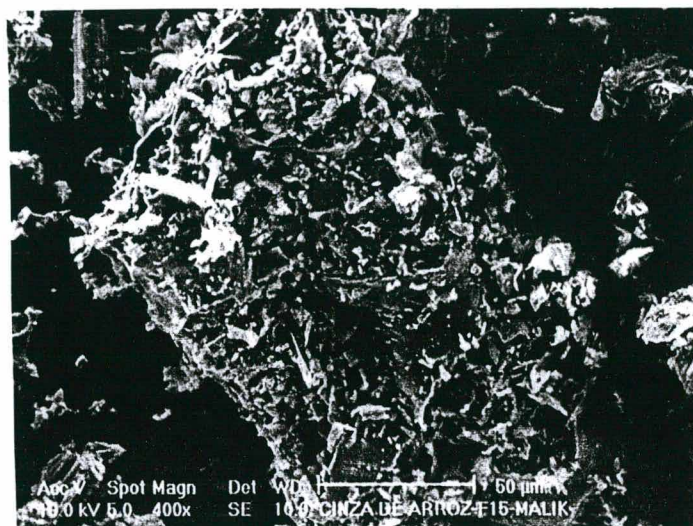
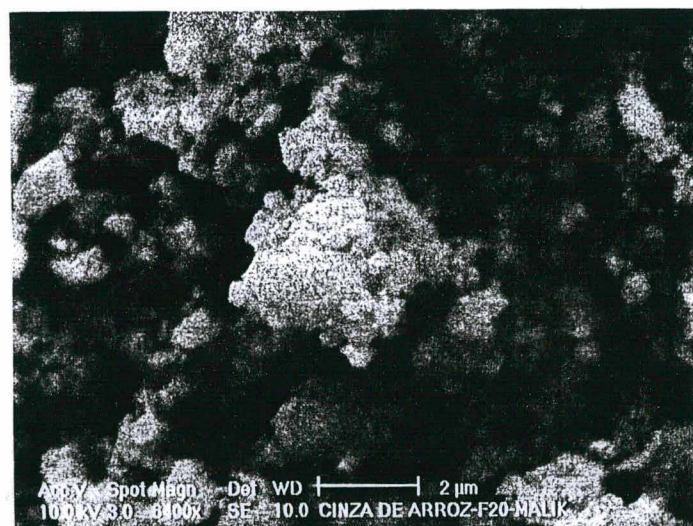


Figura 4.6 - Demanda de água no ensaio de pozolanicidade

A Figura 4.7 mostra esta diminuição do tamanho de grão em função do tempo de moagem.



(a)



(b)

Figura 4.7 - Micrografia da CCA (a) 15 minutos de moagem; (b) 20 horas de moagem

Os resultados obtidos no ensaio de pozolanicidade com cimento, mostraram que o índice de atividade pozolânica da CCA aumenta com o tempo de moagem (aumento da área específica) até o limite de 4 horas (Figura 4.8). Daí em diante, há um decréscimo no índice de pozolanicidade, apesar da demanda de água continuar diminuindo e da área específica continuar aumentando (vide Tabela 4.2). Uma justificativa possível para este fato seria que o aumento da área específica, dificulta a dispersão da cinza na argamassa. As partículas da cinza acabam se agrupando, formando grumos e não reagem, na sua totalidade, com o hidróxido de cálcio liberado no processo de hidratação do cimento.

Em função dos resultados obtidos resolveu-se adotar os tempo de moagem de 2, 4 e 6 horas para a análise do IAP das demais cinzas em estudo.

Quanto à resistência à compressão obtida nas argamassa com diferentes teores de CCA, observou-se ser de 15% o teor ótimo de substituição para um máximo de resistência aos 28 dias e 40% o teor de substituição para uma resistência equivalente àquela apresentada pela argamassa sem cinza, que foi de 37,68 MPa (Figura 4.9). Diante disso, estes teores foram os adotados nos estudos subsequentes realizados tanto em argamassa quanto em concreto.

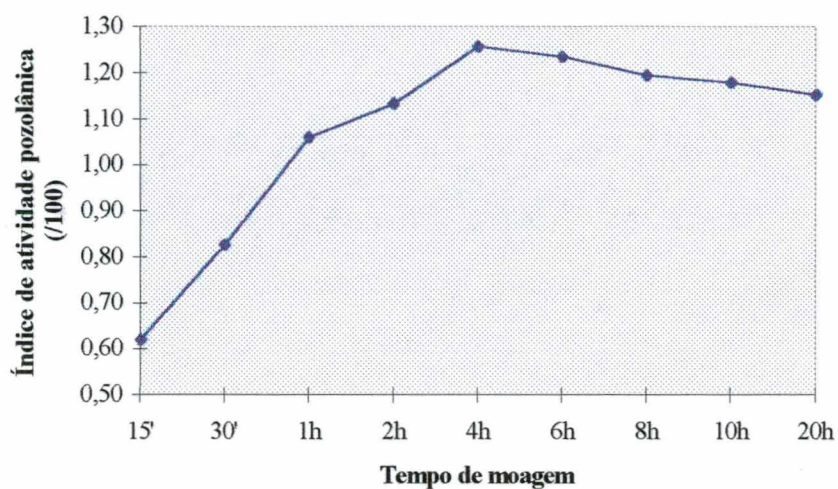


Figura 4.8 - Variação do IAP com o tempo de moagem

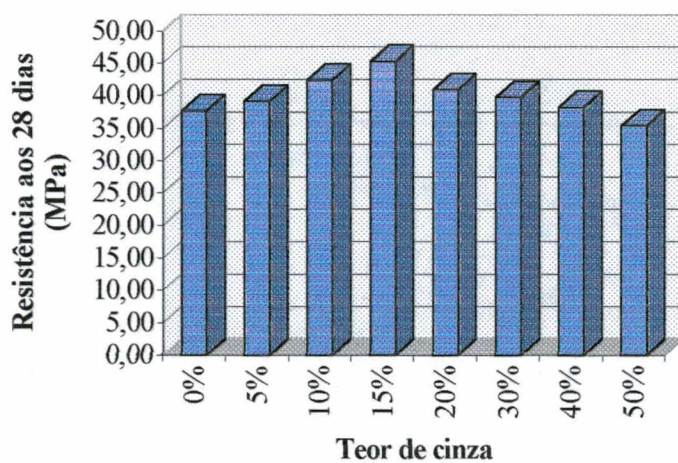


Figura 4.9 - Resistência das argamassas contendo diferentes teores de CCA

4.4 PROGRAMA DE ENSAIOS

Num primeiro estágio, foram realizados os ensaio de caracterização física e química dos materiais a serem utilizados.

O trabalho foi dividido em duas partes: a primeira consistiu do estudo da pozolanicidade e resistência de argamassas moldadas com as diversas cinzas e seu comportamento ao longo do tempo e a segunda, do estudo comparativo entre concretos contendo sílica ativa, cinza volante e cinza de casca de arroz.

Os ensaios, foram realizados nas instalações da CONCREBRAS S/A e no Laboratório de Materiais de Construção - LMCC - da Universidade Federal de Santa Catarina, no período de junho a dezembro de 1.996. As análises químicas e físicas de cimentos e cinzas foram realizadas , respectivamente, nos laboratórios da Cia de Cimento VOTORAN e da Cia de cimento ITAMBÉ, em Curitiba, PR.

4.4.1 Materiais e Equipamentos Utilizados

Foram utilizados no decorrer da pesquisa os materiais e equipamentos descritos e caracterizados a seguir.

4.4.1.1 *Materiais*

◆ Cimento

O cimento utilizado para a confecção das argamassas, foi o CP-I-S 32, cujo ensaio de caracterização foi descrito na Tabela 4.3. Para confeccionar os concretos, foi utilizado o mesmo cimento, porém oriundo de uma nova partida, cuja caracterização é apresentada na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Caracterização do cimento utilizado na fabricação dos concretos.

Análise Física		Análise Química		Análise Mecânica	
ensaio	teor	ensaio	teor	idade (dias)	Resistência (MPa)
peneira # 0,075 mm	0,90%	perda ao fogo	2,90%	1	14,5
peneira # 0,045 mm	8,90%	SiO ₂	19,78%	3	29,20
água da pasta de consistência normal	28,30 %	Al ₂ O ₃	4,67%	7	33,7
massa específica (g/cm ³)	3,15	Fe ₂ O ₃	3,28%	28	39,7
Blaine (m ² /kg)	341	CaO	60,46%		
início de pega (min)	180	MgO	5,25%		
fim de pega (min)	260	K ₂ O	0,59%		
		Na ₂ O	0,05%		
		SO ₃	2,90%		
		resíduo insolúvel	1,30%		

♦ Agregados

O agregado miúdo utilizado para a confecção das argamassas foi areia normal (IPT).

Para os concretos foi utilizado agregado miúdo de origem quartzosa disponível na região, cujas características estão dispostas na Tabela 4.7. Como agregado graúdo, utilizou-se uma brita de origem granítica, com dimensão máxima característica de 12,5 mm. Suas características físicas e distribuição granulométrica, encontram-se na Tabela 4.8.

Tabela 4.7 - Caracterização do agregado miúdo

Peneira (ABNT) Abertura (mm)	% Retida	% Retida acumulada
4,8	0,16	0,16
2,4	2,48	2,64
1,2	13,32	15,96
0,6	42,61	58,57
0,3	32,47	91,03
0,15	7,19	98,22
<0,15	1,78	100
Dimensão máxima característica	2,4	
Módulo de finura	2,67	
Graduação (zona)	3 (média)	
Massa específica aparente	2,65 g/cm ³	

Tabela 4.8 - Caracterização do agregado graúdo

Peneira(ABNT) Abertura (mm)	% Retida	% Retida acumulada
19,0	0,00	0,00
12,5	52,15	52,15
9,5	29,00	81,21
6,3	17,74	98,89
4,8	1,11	100
Dimensão máxima característica	12,5	
Módulo de finura	6,81	
Índice de forma	2,5	
Massa específica aparente	2,77 g/cm ³	

♦ Água

Tanto para a moldagem dos corpos-de-prova de argamassa, como para os de concreto foi utilizada água proveniente da rede de abastecimento local. Para a cura, utilizou-se uma solução de água saturada em hidróxido de cálcio.

♦ Sílica Ativa

A sílica ativa utilizada é de fabricação nacional. Suas características físicas e químicas, fornecidas pelo fabricante, estão descritas na Tabela 4.9 e na Tabela 4.10 respectivamente.

Tabela 4.9 - Características físicas da sílica ativa

Massa Unitária (kg/m^3)	360,00
Massa Específica (kg/m^3)	2.220,00
Área Específica (m^2/kg)	20.000 m^2/kg
Diâmetro Médio da Partícula (μm)	0,20

Tabela 4.10 - Características químicas da sílica ativa

Óxidos	Teor (%)
Fe_2O_3 (máx)	0,09
CaO (máx.)	0,40
Al_2O_3 (máx)	0,45
TiO (máx)	0,01
MgO (máx)	0,80
MnO (máx)	0,05
Na_2O (máx)	0,50
K_2O (máx)	1,20
SiO_2 (mín.)	90,0

♦ Cinza de Casca de Arroz

Apesar de diversos autores afirmarem que uma boa pozolana é conseguida através da queima controlada da casca de arroz (MEHTA e PITT, 1976; DASS, 1983), as cinzas de casca de arroz utilizadas nesta pesquisa, como já descrito anteriormente, são cinzas residuais, produzidas sem controle de temperatura ou de tempo de exposição, provenientes de diferentes processos de queima da casca. As Tabelas 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14, mostram as características físicas e químicas de cada uma delas, sendo que as análises químicas foram realizadas via espectrometria de raio-X. A ocorrência de fechamento abaixo de 99,5% ou acima de 100,5% se deve à diferença de origem entre as amostras analisadas e os

padrões existentes na curva de calibração do raio-X. Já o ensaio de massa específica foi realizado segundo a NBR 6508.

Tabela 4.11 - Caracterização da CCA - indústria F

Ensaio	Amostra		
	F1	F2	F3
Na ₂ O	0,00	0,00	0,00
MgO	1,02	0,38	0,50
Al ₂ O ₃	3,20	1,29	1,36
SiO ₂	78,54	92,95	90,32
SO ₃	0,43	0,03	0,04
K ₂ O	0,94	0,59	0,73
CaO	10,77	1,58	1,67
Fe ₂ O ₃	1,47	0,74	0,85
Perda ao fogo (% médio)	10,85	25,17*	11,35
Massa específica média (g/cm ³)	2,04		

* Valor questionável, devido a possíveis problemas durante o ensaio

Tabela 4.12 - Caracterização da CCA - indústria G

Ensaio	Amostra		
	G1	G2	G3
Na ₂ O	0,00	0,00	0,00
MgO	0,43	0,50	0,37
Al ₂ O ₃	1,50	1,39	1,42
SiO ₂	96,08	95,84	95,12
SO ₃	0,08	0,00	0,00
K ₂ O	0,42	0,46	0,44
CaO	1,27	1,21	1,58
Fe ₂ O ₃	0,88	0,95	1,01
Perda ao fogo (% médio)	11,52	10,78	9,87
Massa específica média (g/cm ³)	2,12		

Tabela 4.13 - Caracterização da CCA - indústria P

Ensaio	Amostra			
	P1	P2	P3	P4*
Na ₂ O	0,01	0,00	0,00	0,00
MgO	0,60	0,62	0,64	0,63
Al ₂ O ₃	5,86	2,20	1,81	1,90
SiO ₂	89,38	84,39	93,86	93,50
SO ₃	0,00	0,00	0,05	0,03
K ₂ O	0,79	0,67	0,62	0,60
CaO	1,39	1,23	1,17	1,17
Fe ₂ O ₃	2,16	1,02	0,91	0,98
Perda ao fogo (% médio)	6,80	6,15	5,26	4,44
Massa específica média (g/cm ³)	2,10			

(*) amostra utilizada na confecção dos concretos

Tabela 4.14 - Caracterização da CCA - indústria R

Ensaio	Amostra		
	R1	R2	R3
Na ₂ O	0,00	0,00	0,00
MgO	0,54	0,40	0,43
Al ₂ O ₃	1,46	1,48	1,40
SiO ₂	91,56	95,14	95,64
SO ₃	0,03	0,02	0,00
K ₂ O	0,50	0,46	0,47
CaO	3,50	1,37	1,30
Fe ₂ O ₃	1,65	1,17	0,95
Perda ao fogo	10,32	9,06	9,18
Massa específica média (g/cm ³)	1,93		

♦ Cinzas de Referência

Para que se pudesse avaliar o desempenho das cinzas de casca de arroz produzidas sem controle da temperatura de queima, foi escolhida como CCA de referência, uma cinza oriunda do município de Pelotas/RS. A escolha dessa cinza deve-se ao fato de sua eficiência como pozolana já ter sido comprovada por outros trabalhos (CINCOTTO, 1984; SILVEIRA e RUARO, 1995; SILVEIRA, 1996). Essa cinza é obtida por um sistema de queima da casca de arroz não utilizado pelas beneficiadoras de Santa Catarina, denominado “leito fluidizado”.

Entende-se por leito fluidizado a técnica de manter o reagente sólido (material carbonoso a ser queimado) em suspensão e movimento constante por uma corrente de fluido (agente gaseificante, nesse caso, ar) (CIENITEC, 1986).

A origem da utilização de reatores tipo leito fluidizado em processo de gaseificação foi para o carvão mineral - Processo Winkler -, desenvolvido na Alemanha há cerca de 60 anos. A Figura 4.10 mostra um fluxograma simplificado do processo.

Outra cinza utilizada como parâmetro de avaliação do desempenho da cinza de casca de arroz, foi a cinza volante proveniente da Usina Termoelétrica Jorge Lacerda, de Capivari de Baixo/SC, produzida pela queima de carvão mineral. O uso corrente dessa cinza como adição pelas cimenteiras da região, comprova sua eficiência com pozolana.

As características físicas e químicas da cinza produzida em leito fluidizado e da cinza volante encontram-se na Tabela 4.15.

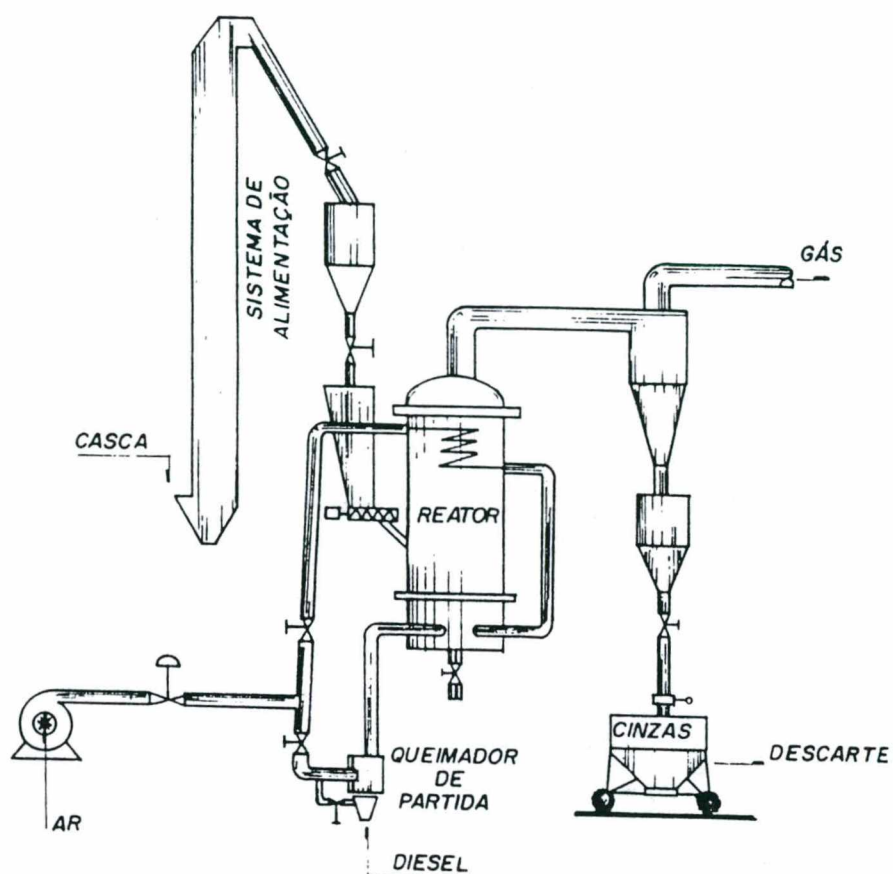


Figura 4.10 - Fluxograma simplificado: geração de cinza a partir da queima da casca de arroz em leito fluidizado (CIENTEC, 1986)

Tabela 4.15 - Características físicas e químicas da CCA produzida em leito fluidizado e da cinza volante

Ensaio	Amostra	
	Leito Fluifizado	Cinza Volante
Na ₂ O	0,61	0,00
MgO	1,85	1,06
Al ₂ O ₃	1,00	22,23
SiO ₂	92,85	59,67
SO ₃	0,09	0,47
K ₂ O	3,40	1,49
CaO	0,59	2,00
Fe ₂ O ₃	0,05	7,96
Perda ao fogo (%)	5,06	18,36*
Massa específica (g/cm ³)	2,00	2,05

* Valor questionável devido a possíveis problemas de ensaio

4.4.1.2 Equipamentos

Para a realização dos ensaios previstos no desenvolvimento da pesquisa foram utilizados os equipamento listados a seguir.

♦ Vidrarias

A Tabela 4.16 apresenta uma listagem da vidraria utilizada para cada ensaio realizado.

Tabela 4.16 - Vidrarias

Vidraria	Ensaio
Frasco volumétrico de Le Chaterlier	Massa específica de cimento Portland (NBR 6474)
Frasco de Chapmann, funil de vidro	Massa específica de agregado miúdo (NBR 9776)
Picnômetro 500 ml, funil de vidro	Massa específica da CCA (NBR 6508)

♦ Balanças

Foram utilizadas uma balança eletrônica com capacidade 1500 g e precisão de 0,01 g, marca MARTE - AS 5500, para a pesagem de cimento, pozolanas, areia normal (destinada à confecção das argamassa) e água. Agregado graúdo e miúdo para a confecção dos concretos foram pesados em balança eletrônica com capacidade de carga 15000 g e precisão de 5 g, marca MICROWA.

♦ Moldes

Para a moldagem dos corpos-de-prova de argamassa foram utilizados moldes metálicos, cilíndricos, de dimensões 5 x 10 cm. Os corpos-de-prova de concreto foram igualmente confeccionados em moldes metálicos, cilíndricos, de dimensões 10 x 20 cm.

♦ Estufa

Para a cura dos corpos-de-prova do ensaio de pozolanicidade com cimento, foi utilizada uma estufa com controle eletrônico de temperatura, digital, marca MEMMERT-BE 800, com precisão de 1° C. Para a secagem dos materiais foi utilizada uma estufa da marca FANEN - 315/5, com precisão de 1° C.

♦ Prensa Hidráulica

O ensaio de resistência à compressão dos corpos-de-prova de argamassa, foi realizado de acordo com o que estabelece a NBR 7215/82, utilizando-se uma prensa hidráulica marca AMSLER, (Figura 4.11) com controle de carga manual e escalas de 50, 250 e 500 toneladas, com precisão de 100, 500 e 1000 kg respectivamente. Os corpos de prova de concreto foram ensaiados conforme as prescrições da NBR 5739/74 na mesma prensa onde foram ensaiados os corpos-de-prova de argamassa.

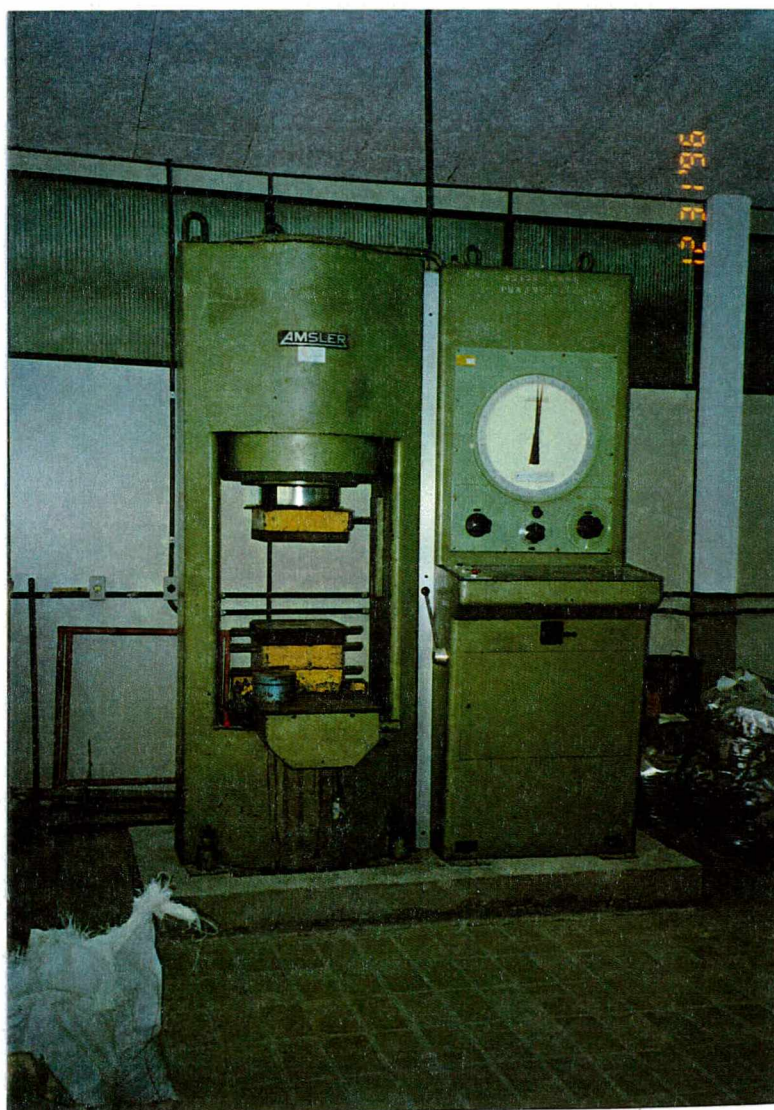


Figura 4.11 - Prensa hidráulica utilizada para o ensaio de resistência à compressão axial de corpos-de-prova de concreto e argamassa.

♦ Misturador mecânico

Para a mistura das argamassas foi utilizado um misturador mecânico, marca EMIC, com duas velocidades, cuja capacidade da cuba e dimensões atendem o que prescreve a NBR 7215/82.

♦ Betoneira

A mistura dos materiais para confecção dos concretos foi feita em betoneira intermitente, de eixo inclinado, com as pás solidárias à cuba e capacidade da cuba de 120 l, marca ZANNONI.

4.4.2 Ensaios Realizados

Para a realização dos ensaios, as amostras de cinza previamente quarteadas e embaladas, sofreram um processo de moagem, realizado em moinho de bolas cujas especificações já foram descritas no item 4.4.1, nos tempos de moagem indicados pelo programa piloto que foram 2, 4 e 6 horas. Cada cinza, após seca em estufa por 24 horas a 105⁰ C, era colocada no moinho e, completando-se o intervalo de tempo pré-estabelecido, fazia-se a coleta do material.

4.4.2.1 Pozolanicidade com cimento

O ensaio de pozolanicidade com cimento foi realizado segundo o que prescreve a NBR 5752/92 e já descrito anteriormente no item 4.4.2, para cada uma das amostras, nos 3 tempos de moagem, estabelecidos no programa piloto, que correspondem às áreas específicas descritas na Tabela 4.17. O mesmo critério foi adotado para a cinza de referência, produzida em leito fluidizado. A cinza volante, dispensa o processo de moagem. Assim, foram moldados, ao final, 126 corpos-de-prova. As Tabelas 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21 mostram a dosagem utilizada para cada amostra.

Tabela 4.17 -Área específica

Área Específica Blaine (m²/kg)			
Amostra	Tempo de moagem (h)		
	2	4	6
F1	1604	1614	1772
F2	1546	1707	1977
F3	1587	1724	1894
G1	691	920	936
G2	850	864	1056
G3	588	743	961
P1	1058	1687	1803
P2	1334	1696	1744
P3	1033	1537	1911
P4	-	-	1893
R1	1022	1643	1827
R2	913	1546	1779
R3	826	1432	1693
LF	1453	1785	1973
CV	638		

Tabela 4.18 - Dosagem de material para ensaio de pozolanicidade com cimento - indústria F

Amostra	Tempo de moagem (h)	Cimento (g)	Areia (g)	Cinza (g)	Água (g)
controle	-	312,00	936,00	-	162,22
F1	2	202,80	936,00	70,72	179,19
	4	202,80	936,00	70,72	177,74
	6	202,80	936,00	70,72	176,64
F2	2	202,80	936,00	70,72	179,00
	4	202,80	936,00	70,72	177,00
	6	202,80	936,00	70,72	170,00
F3	2	202,80	936,00	70,72	188,45
	4	202,80	936,00	70,72	180,73
	6	202,80	936,00	70,72	175,56

Tabela 4.19 - Dosagem de material para ensaio de pozolanicidade com cimento - indústria G

Amostra	Tempo de moagem (h)	Cimento (g)	Areia (g)	Cinza (g)	Água (g)
controle	-	312,00	936,00	-	162,22
G1	2	202,80	936,00	73,49	178,65
	4	202,80	936,00	73,49	170,57
	6	202,80	936,00	73,49	170,55
G2	2	202,80	936,00	73,49	159,50
	4	202,80	936,00	73,49	156,20
	6	202,80	936,00	73,49	153,30
G3	2	202,80	936,00	73,49	178,24
	4	202,80	936,00	73,49	173,00
	6	202,80	936,00	73,49	169,31

Tabela 4.20 - Dosagem de material para ensaio de pozolanicidade com cimento - indústria P

Amostra	Tempo de moagem (h)	Cimento (g)	Areia (g)	Cinza (g)	Água (g)
controle	-	312,00	936,00	-	162,22
P1	2	202,80	936,00	72,80	172,55
	4	202,80	936,00	72,80	168,39
	6	202,80	936,00	72,80	165,66
P2	2	202,80	936,00	72,80	178,04
	4	202,80	936,00	72,80	175,28
	6	202,80	936,00	72,80	174,00
P3	2	202,80	936,00	72,80	174,21
	4	202,80	936,00	72,80	171,70
	6	202,80	936,00	72,80	169,31
P4*	6	202,80	936,00	72,80	170,15

(*) amostra utilizada para a confecção de concreto

Tabela 4.21 - Dosagem de material para ensaio de pozolanicidade com cimento - indústria R

Amostra	Tempo de moagem (h)	Cimento (g)	Areia (g)	Cinza (g)	Água (g)
controle	-	312,00	936,00	-	162,22
R1	2	202,80	936,00	66,91	164,08
	4	202,80	936,00	66,91	162,66
	6	202,80	936,00	66,91	161,41
R2	2	202,80	936,00	66,91	174,71
	4	202,80	936,00	66,91	169,30
	6	202,80	936,00	66,91	168,75
R3	2	202,80	936,00	66,91	175,90
	4	202,80	936,00	66,91	173,64
	6	202,80	936,00	66,91	170,90

Tabela 4.22 - Dosagem de material para ensaio de pozolanicidade com cimento - cinza produzida em **Leito Fluidizado, Cinza Volante e Sílica Ativa**

Amostra	Tempo de moagem (h)	Cimento (g)	Areia (g)	Cinza (g)	Água (g)
controle	-	312,00	936,00	-	162,22
LF	2	202,80	936,00	69,33	182,99
	4	202,80	936,00	69,33	173,79
	6	202,80	936,00	69,33	171,32
CV	-	202,80	936,00	71,07	175,72
SA	-	202,80	936,00	76,96	203,99

4.4.2.2 Resistência à Compressão

♦ Argamassa

Com relação à resistência à compressão das argamassas, o programa piloto (item 4.3.4) apresentou como resultados que o teor ótimo de substituição, visando um máximo de resistência aos 28 dias, seria de 15%. Já para obter-se uma resistência equivalente àquela da argamassa de controle, 40% de substituição de cimento por CCA seria o ideal.

Diante disso, foram confeccionadas argamassas num tempo de moagem escolhido para cada amostra de cinza de casca de arroz. A escolha do tempo de moagem foi baseada no resultado do ensaio de pozolanicidade. O tempo de moagem eleito para cada uma das CCA foi aquele cujo ensaio de pozolanicidade resultou nos maiores valores. Como houve uma variação nos índices de atividade pozolânica para tempos de moagem iguais, uma vez que as amostras foram coletadas em épocas diferentes, as amostras escolhidas para a confecção das argamassas foram aquelas cujo IAP foi o mais baixo dentro do tempo de moagem selecionado. A Tabela 4.23, relaciona quais tempo e amostra foram escolhidos para cada cinza.

Tabela 4.23 - Tempo de moagem escolhido para ensaio de resistência à compressão, para cada uma das CCA.

Amostra	tempo de moagem (h)	Área específica (m²/kg)	IAP (%)
F2	4	1707	112
G2	6	1056	108
P3	6	1911	127
R2	6	1693	96
LF	4	1973	109

nota: os valores dos IAP de cada amostra em cada tempo de moagem, são apresentados nas tabelas 5.1,2,3,4 e 5.

Uma vez selecionadas as amostras, foram confeccionadas as argamassas para o ensaio de resistência à compressão com teores de substituição de 15 e 40%, seguindo procedimentos de ensaio já descritos no item 4.4.3. Ressalva deve ser feita quanto à sílica ativa, que dada a sua elevada finura e para garantir uma mistura adequada, foi misturada à seco com o cimento, antes da adição de água. As Tabelas 4.24 e 4.25 mostram as dosagens de material para cada ensaio.

Tabela 4.24 - Dosagem de material para ensaio de resistência à compressão de argamassas com 15% de CCA

15% de substituição - traço de controle 1:3							
Amostra	F	G	P	R	LF	CV	MS
tempo de moagem (h)	4	6	6	6	4	-	-
cimento (g)	583,44	583,44	583,44	583,44	583,44	583,44	583,44
cinza (g)	66,68	69,29	68,64	63,08	65,37	67,01	72,56
areia (g)	1927,37	1988,48	2030,98	1907,05	2001,52	2059,20	1819,73
água (g)	356,40	356,40	356,40	356,40	356,40	356,40	356,40
traço final	1:2,81	1:2,90	1:2,96	1:2,78	1:2,92	1:3,00	1:2,65
flow test (mm)	224	226	224	228	223	224	228

Tabela 4.25 - Dosagem de material para ensaio de resistência à compressão de argamassas com 40% de CCA

40% de substituição- traço de controle 1:3						
Amostra	F	G	P	R	LF	CV
tempo de moagem (h)	4	6	6	6	4	-
cimento (g)	449,28	449,28	449,28	449,28	449,28	449,28
cinza (g)	193,97	201,58	199,68	183,52	190,17	194,93
areia (g)	1994,40	2222,47	2191,94	2170,50	2091,59	2143,22
água (g)	388,80	388,80	388,80	388,80	388,80	388,80
traço final	2,66	2,97	2,93	2,90	2,79	2,86
flow test (mm)	224	230	222	228	230	227

nota: o uso de um teor de substituição de 40% de sílica ativa não é justificado, dado ao alto consumo de água exigido pelo material

Como argamassa de controle, foi utilizada a mesma argamassa do programa piloto, cuja dosagem encontra-se na Tabela 4.4. A Figura 4.12 mostra os corpos-de-prova ao serem retirados da água para o ensaio de resistência à compressão e a Figura 4.13 mostra, em detalhe, um corpo-de-prova já rompido.

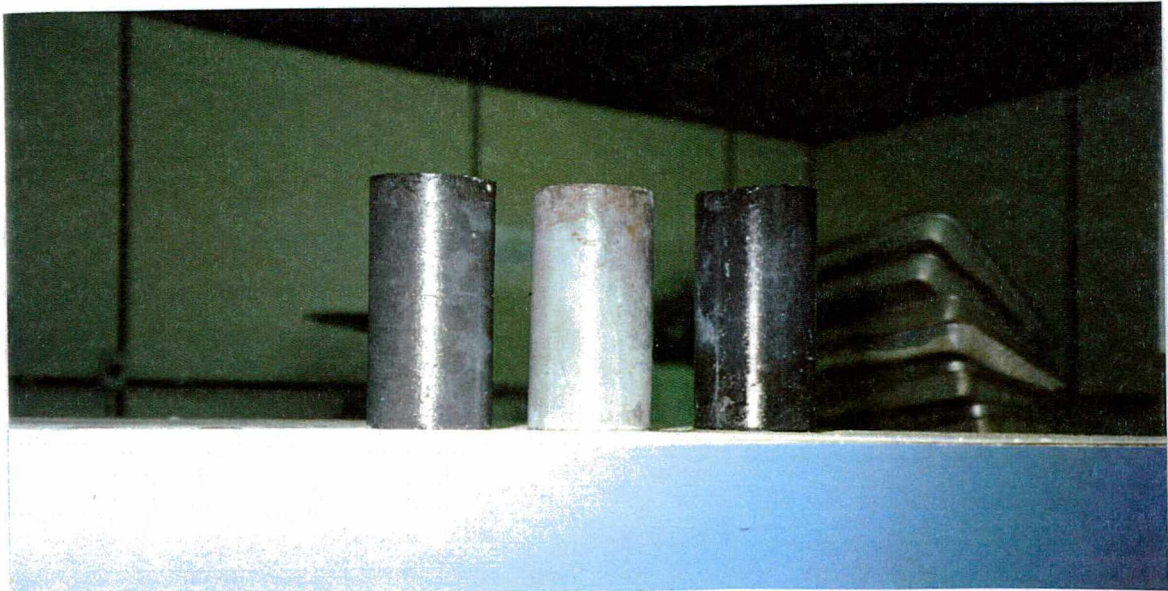


Figura 4.12- Corpos-de-prova de argamassa ao serem retirados da água



Figura 4.13 - Corpo-de-prova de argamassa com cinza de casca de arroz, após o rompimento

◆ Concreto

Para a dosagem dos concretos, foram utilizados 3 traços, levando-se em consideração a relação água/(cimento+pozolana) em massa equivalente (vide página 46) e o teor de substituição das pozolanas. A metodologia foi baseada na dosagem do IPT/EPUSP, descrita por HELENE e TERZIAN (1992). Os parâmetros de dosagem para os traços iniciais foram: abatimento de (7 ± 1) cm e teor de argamassa de 56%. A correção do abatimento (trabalhabilidade), necessária em função da adição de pozolanas (CCA, CV, SA), foi feita da mesma forma descrita para as argamassas, ou seja, com a incorporação gradativa de agregado, o que levou a uma mudança no traço para os concretos com adição de pozolanas.

Igualmente como o que aconteceu quando da dosagem das argamassas, a substituição do cimento por pozolana, foi feita em volume absoluto de cimento.

Foram confeccionados 5 concretos diferentes, como mostra a Tabela 4.26.

Tabela 4.26 - Relação dos concretos confeccionados

Concreto	Pozolana	Teor de Substituição (%)
Controle	-	-
SA 15	Sílica Ativa	15
CV 40	Cinza Volante	40
CCA 15	Cinza de Casca de Arroz	15
CCA 40	Cinza de Casca de Arroz	40

A cinza de casca de arroz utilizada para a fabricação dos concretos, foi a da **indústria P**, moída por 6 horas, escolhida por apresentar os melhores índices de pozolanicidade com cimento neste tempo de moagem.

Foram moldados 12 corpos-de-prova para cada relação a/cp, ensaiando-se 3 para cada idade (3, 7, 28, 90 dias), totalizando 180 corpos-de-prova de concreto.

De forma a garantir uma melhor homogeneidade, as pozolanas foram misturadas ao cimento à seco. Os materiais foram colocados na betoneira obedecendo a seguinte ordem:

- 60% de agregado graúdo utilizado no concreto de controle
- 30% de água
- 100% de cimento + 100% de pozolana + 30% de água
- 60% de agregado miúdo utilizado no concreto de controle
- 40% da água

Após a mistura do material, fazia-se, quando necessário, o ensaio de abatimento de tronco de cone (Figura 4.14). Quando necessário, porque, muitas vezes, visualmente, era possível afirmar que o abatimento estava muito acima do estabelecido, o que dispensava o ensaio. Quando isso acontecia, fazia-se acréscimos de agregado graúdo e agregado miúdo de 10, 5 ou 2,5%, até que o abatimento desejado fosse alcançado. Uma vez que isso acontecia, os corpos-de-prova eram imediatamente moldados, etiquetados, cobertos com plástico e levados à cura nas formas por 24 horas. Passado esse período, procedia-se a desforma e os corpos-de-prova eram levados à cura imersa em solução de água saturada em hidróxido de cálcio, com temperatura controlada em $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, pelo tempo que fosse necessário (3, 7, 28 ou 90 dias). Vencido o prazo para o ensaio, os corpos-de-prova eram retirados da água com 1 hora de antecedência (Figura 4.15), recebiam o capeamento com enxofre e realizava-se o ensaio de resistência à compressão. As Tabelas 4.27, 4.28 e 4.29 apresentam as dosagens de material utilizadas para cada relação a/cp.



Figura 4.14 - Aspecto do concreto com cinza de casca de arroz, durante o ensaio de abatimento *slump test*.



Figura 4.15 - Corpos-de-prova de concreto ao serem retirados da água. Da esquerda para a direita: referência, sílica ativa, cinza volante, cinza de casca de arroz

Tabela 4.27 - Dosagem de material - $a/cp = 0,4$

Concreto	Controle	SA 15	CV 40	CCA 15	CCA 40
cimento (kg)	12,08	11,81	9,06	12,84	7,25
pozolana (kg)	-	1,47	3,93	1,51	4,03
areia(kg)	14,98	10,34	15,92	18,26	14,98
brita (kg)	21,27	14,67	22,60	25,92	21,27
a/cp	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
traço final	1:3,00	1:1,80	1:2,55	1:2,97	1:2,75
abatimento (cm)	6,5	6,0	6,0	7,0	7,0

Tabela 4.28 - Dosagem de material - $a/cp = 0,5$

Concreto	Controle	SA 15	CV 40	CCA 15	CCA 40
cimento (g)	9,60	10,20	7,20	10,20	7,20
pozolana (g)	-	1,27	3,12	1,20	3,20
areia(g)	17,29	18,91	21,61	19,99	17,29
brita (g)	21,13	23,11	26,41	24,43	21,13
a/cp	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
traço final	1:4,00	1:3,50	1:4,00	1:3,87	1:3,64
abatimento (cm)	7,0	6,5	6,0	7,5	7,5

Tabela 4.29 - Dosagem de material - $a/cp = 0,6$

Concreto	Controle	SA 15	CV 40	CCA 15	CCA 40
cimento (g)	7,97	8,47	5,98	8,47	5,98
pozolana (g)	-	1,05	2,59	1,00	2,66
areia(g)	18,80	18,80	21,15	22,33	18,80
brita (g)	21,04	21,04	23,66	24,98	21,04
a/cp	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
traço final	1:5,00	1:4,00	1:4,50	1:4,88	1:4,53
abatimento (cm)	6,0	8,0	6,50	7,0	7,0

A opção pela correção da trabalhabilidade dos concretos usando-se incorporação de teores iguais de agregado graúdo e agregado miúdo, implicou em dois fatores:

- a) Para que na hora da moldagem não faltasse material, houve necessidade de majorar a quantidade de material de todos os concretos. Na a relação $a/cp = 0,4$, da sílica ativa, o fator de correção foi 15% e para todos os demais, 25%. A mudança no fator de correção foi devida ao fato de que na confecção do primeiro concreto, contendo sílica ativa num teor de substituição de 15%, a quantidade de material utilizada para que se alcançasse o abatimento desejado, foi, exatamente, o suficiente para a moldagem dos 12 corpos-de-prova . Para evitar que nos próximos concretos faltasse material para completar a moldagem prevista, foi adotado o fator de correção de 25% . Por este motivo, como pode ser notado na Tabela 4.29, as quantidades de material variam de um concreto para outro, dentro de uma mesma relação a/cp ;
- b) apesar de garantidos a relação a/cp e o volume de pasta, uma vez que a substituição do cimento por pozolana se fez em volume absoluto, a incorporação de agregado, fez variar a quantidade de materiais secos para cada concreto e, conseqüentemente, o teor de argamassa inicial

5. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 POZOLANICIDADE COM CIMENTO

Como um dos objetivos principais desta pesquisa foi viabilizar de uso da cinza de casca de arroz residual como pozolana, ênfase especial foi dada ao estudo de sua atividade pozolânica com cimento, de acordo com a NBR 5752/92. As Tabelas 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5 apresentam os resultados obtidos como índice de atividade pozolânica para cada cinza de casca de arroz, de acordo com a data de coleta da amostra e com o tempo de moagem.

Tabela 5.1 - Índice de atividade pozolânica com cimento - indústria F

Amostra	Tempo de moagem (h)	Flow test (mm)	IAP (%)
controle	-	224	-
	2	223	104
F1	4	226	116
	6	221	114
	2	230	97
F2	4	223	112
	6	230	101
	2	221	101
F3	4	221	116
	6	222	106

Tabela 5.2 - Índice de atividade pozolânica com cimento - **indústria G**

Amostra	Tempo de moagem (h)	Flow test (mm)	IAP (%)
controle	-	224	
G1	2	223	99
	4	221	103
	6	220	116
G2	2	230	88
	4	221	96
	6	220	108
G3	2	223	89
	4	222	100
	6	220	111

Tabela 5.3 - Índice de atividade pozolânica com cimento - **indústria P**

Amostra	Tempo de moagem (h)	Flow test (mm)	IAP (%)
controle	-	224	
P1	2	220	109
	4	221	124
	6	220	132
P2	2	223	115
	4	225	128
	6	220	131
P3	2	223	112
	4	222	120
	6	220	127
P4	6	221	126

Tabela 5.4 - Índice de atividade pozolânica com cimento - **indústria R**

Amostra	Tempo de moagem (h)	Flow test (mm)	IAP (%)
controle	-	224	
R1	2	222	89
	4	222	101
	6	220	109
R2	2	222	87
	4	223	90
	6	220	96
R3	2	222	91
	4	224	94
	6	220	101

Tabela 5.5 - Índice de atividade pozolânica com cimento - cinza de **Leito Fluidizado, Cinza Volante e Silica Ativa**

Amostra	Tempo de moagem (h)	Flow test (mm)	IAP (%)
controle	-	224	
LF	2	221	94
	4	222	109
	6	222	108
CV	2	230	78
SA	4	221	102

Partindo-se dos resultados individuais dos IAP, foi realizada uma análise de variância, objetivando comprovar, através da estatística, a influência dos fatores analisados (processo de queima, época da coleta da amostra, tempo de moagem das CCA) e suas possíveis interações, no índice de atividade pozolânica da cinza de casca de arroz residual. A Tabela 5.6 traz um resumo dos resultados obtidos nesta análise.

Tabela 5.6 - Resultados obtidos na análise de variância do IAP

Fator	Grau de liberdade	Média Quadrada	F_{calculado}	F_{0,05}**
1 - processo de queima da CCA	3	0,372	120,00	2,66*
2 - data da coleta da amostra	2	0,044	14,19	3,13*
3 - tempo de moagem da CCA	2	0,175	56,45	3,13*
1-2	6	0,0098	3,16	2,15*
1-3	6	0,0172	5,55	2,15*
2-3	4	0,0026	0,84	2,43
1-2-3	12	0,0042	1,35	1,81
resíduo	72	0,0031		
total	107			

(*) efeito significativo

(**) valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

Com a análise de variância constatou-se que tanto o processo de queima, como a data da coleta da amostra e o tempo de moagem, apresentam efeitos significativos sobre o índice de atividade pozolânica das cinzas de casca de arroz residuais, sendo o fator 1 - processo de queima, o mais significativo. As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3, respectivamente, evidenciam estas influências.

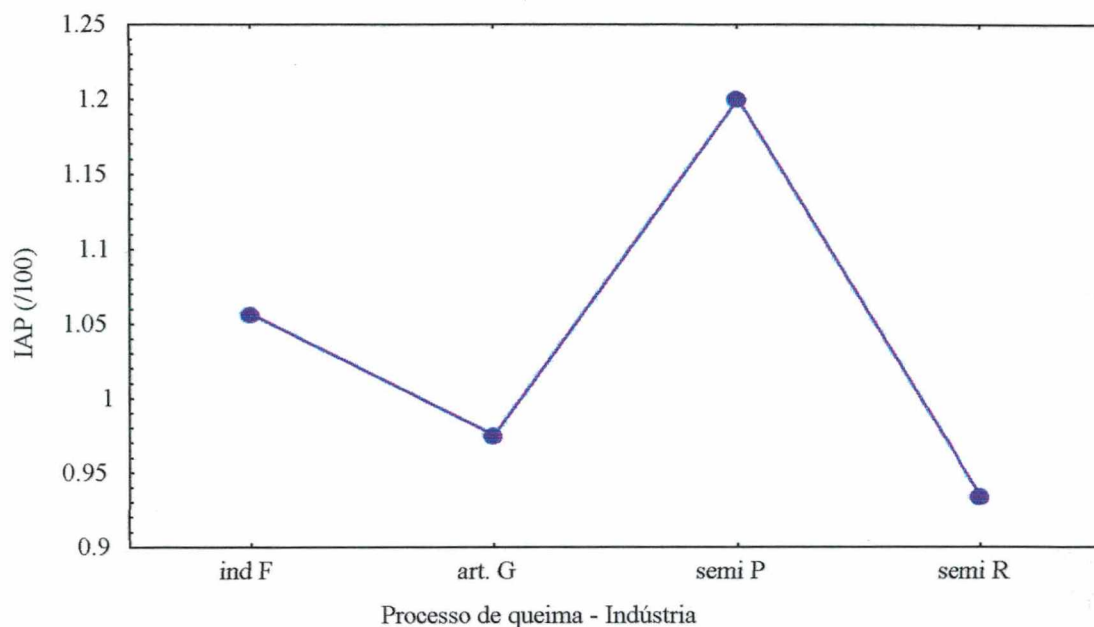


Figura 5.1 - Efeito significativo do processo de queima no IAP de cinzas de casca de arroz residuais

O processo de queima semi-industrializado da indústria P (via seca) apresentou índices de atividade pozolânica sistematicamente maiores que os demais processos, nos tempos de moagem estudados.

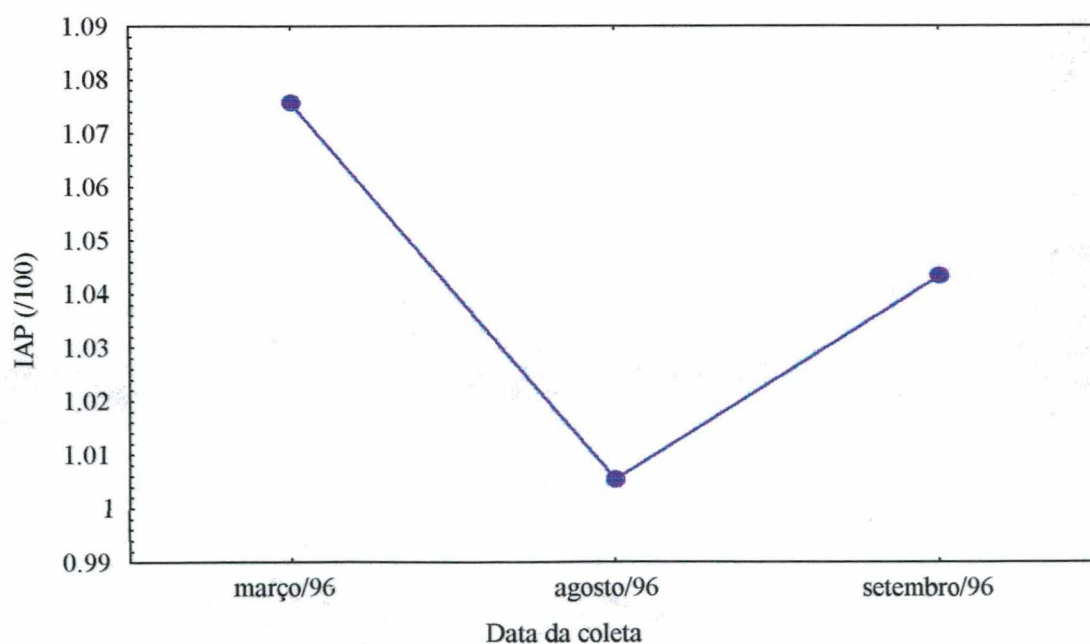


Figura 5.2 - Efeito significativo da data da coleta no IAP das cinzas de casca de arroz residuais

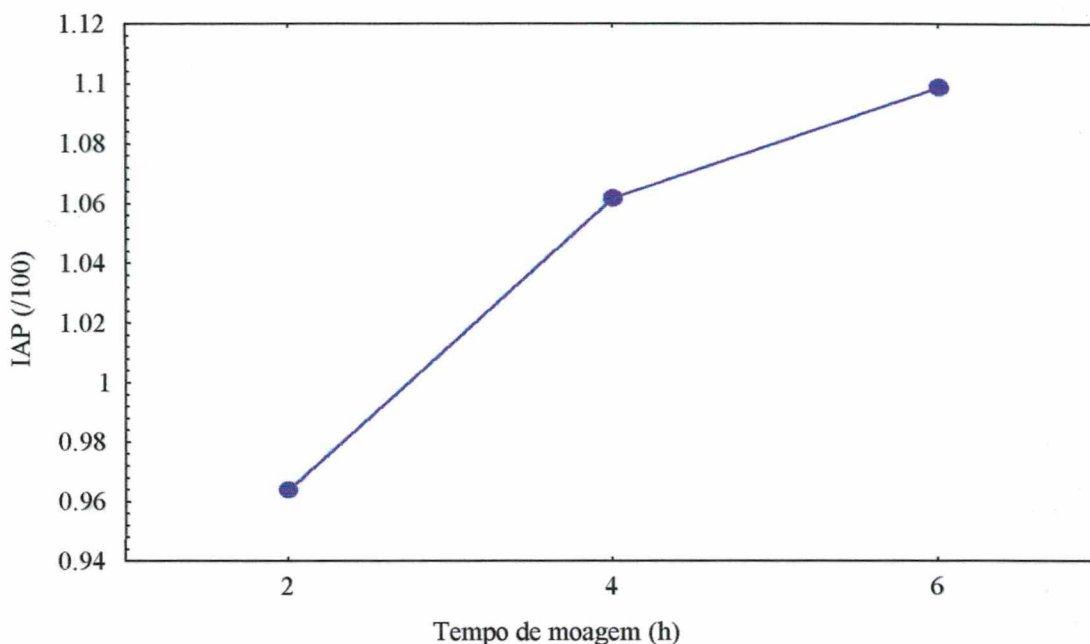


Figura 5.3 - Efeito significativo do tempo de moagem no IAP das cinzas de casca de arroz residuais

A análise de variância também mostrou que a data de coleta influi de forma significativa no índice de atividade pozolânica das cinzas, assinalando que existe uma variação das características da cinza de arroz ao longo do tempo (Figura 5.2). Todavia, realizando-se um teste de normalidade da amostra estudada (NANNI, 1986), conclui-se que o índice de atividade pozolânica apresenta uma distribuição normal ao longo do tempo. A Tabela 5.7 mostra um resumo desta análise.

Tabela 5.7 - Teste de normalidade da amostra - Komolgorov-Smirnov

nº de observações	108
$D_{0,05} (108)$	0,0852
DM	0,1032
$DM > D_{0,05} (108)$	a hipótese da normalidade não pode ser rejeitada
IAP médio	105%
desvio padrão	0,13

Com esse resultado e prevendo uma possível utilização de uma das cinzas produzidas em qualquer desses processo, foi calculado o valor mínimo esperado para o índice de atividade pozolânica. Os resultados, obtidos a partir dos valores individuais dos IAP, mostraram que, com 95% de confiança, pode-se afirmar que nenhum índice de atividade pozolânica será inferior a 83%, (valor superior ao mínimo exigido pela NBR 12653, que é 75%), o que viabiliza o uso das CCA residuais estudadas como pozolana para uso em concretos e argamassas.

Avaliando-se as interrelações, aquela entre processo de queima e tempo de moagem, mostrou-se a mais significativa. Tal resultado deixa claro que dependendo do processo de queima, a cinza de casca de arroz vai apresentar um tempo de moagem ótimo, ou seja, uma área específica que leva à melhor reatividade do material quando adicionado ao cimento Portland comum.

A Figura 5.4 mostra que as cinzas geradas pelos processos artesanal (G) e semi-industrializado (P e R), apresentam um aumento do índice de atividade pozolânica, diretamente ligado ao aumento do tempo de moagem dentro da faixa estudada. Já a cinza produzida pelo processo industrializado (F), apresenta um valor máximo para o IAP correspondente a um tempo de moagem de 4 horas. Este fato pode ser explicado pela maior facilidade de moagem da cinza F (maior área específica média para todos os tempos de moagem estudados - Tabela 4.17).

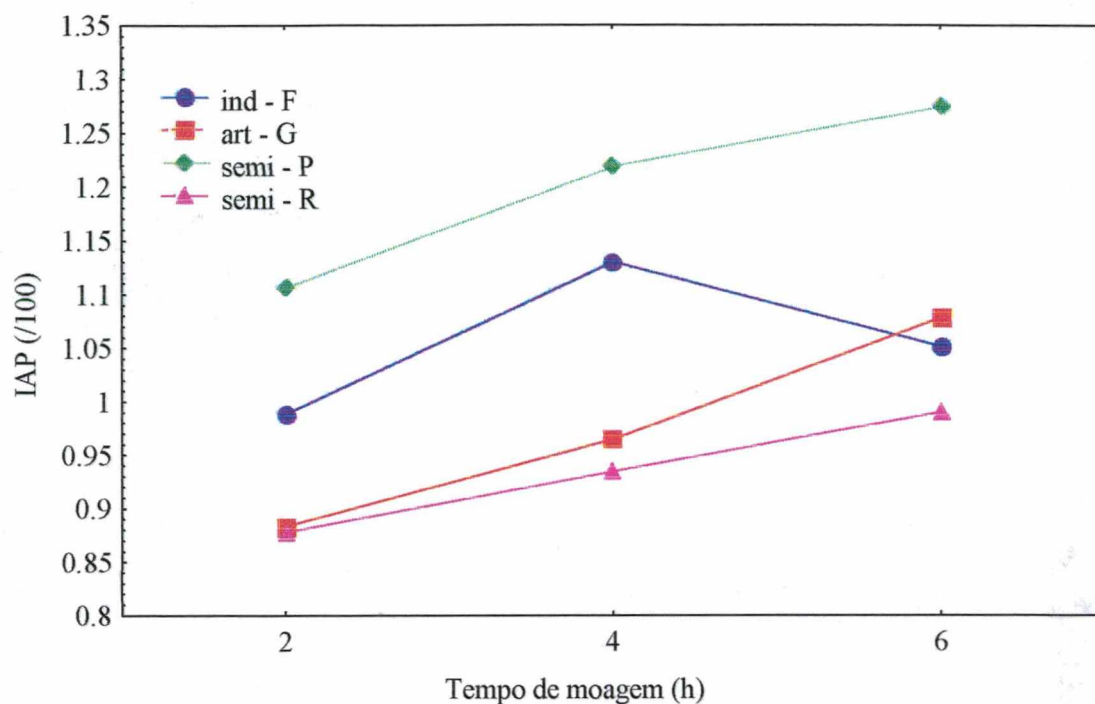


Figura 5.4 - Efeito significativo do processo de queima e do tempo de moagem no IAP das CCA residuais

5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE ARGAMASSAS

Nas Tabelas 5.8 e 5.9, são apresentados os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão realizados aos 3, 7, 28 e 90 dias, dos corpos-de-prova de argamassa com teores de substituição de 15% e 40% respectivamente. As Figuras 5.5 e 5.6 mostram a evolução de resistência à compressão para as quatro idades, para os dois teores de substituição de cinza de casca de arroz estudados.

Tabela 5.8 - Resistência à compressão de argamassa - 15% de CCA

Resistência Média (MPa)				
Argamassa	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias
Controle	21,48	32,26	37,28	43,61
F	30,69	38,20	47,36	54,24
G	29,54	37,43	43,54	49,15
P	28,52	33,61	42,53	52,96
R	25,57	29,54	38,20	44,05
LF	26,48	32,59	40,23	49,09
CV	23,68	26,48	34,89	39,72
SA	29,54	36,92	46,86	50,93

Tabela 5.9 Resistência à compressão de argamassa - 40% de CCA

Resistência Média (MPa)				
Argamassa	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias
Controle	21,48	32,26	37,28	43,61
F	18,59	30,30	39,47	44,82
G	18,59	25,46	38,45	43,29
P	18,84	26,74	38,71	46,09
R	14,77	19,10	30,30	35,14
LF	18,33	25,21	37,43	39,02
CV	14,01	18,59	27,50	32,85

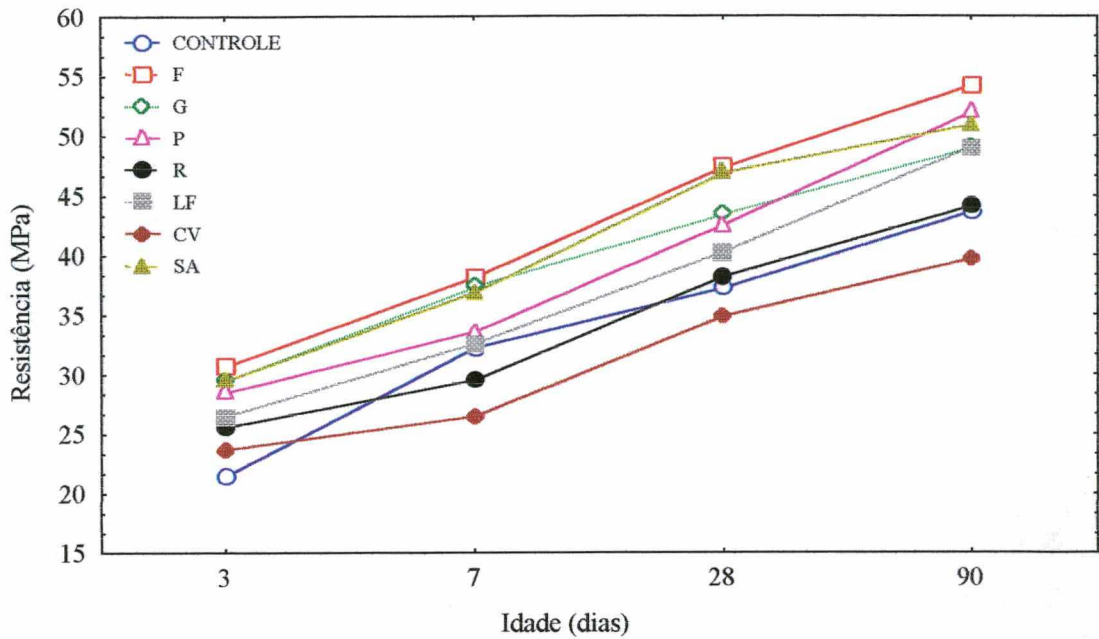


Figura 5.5 Evolução de resistência de argamassas - 15% de CCA

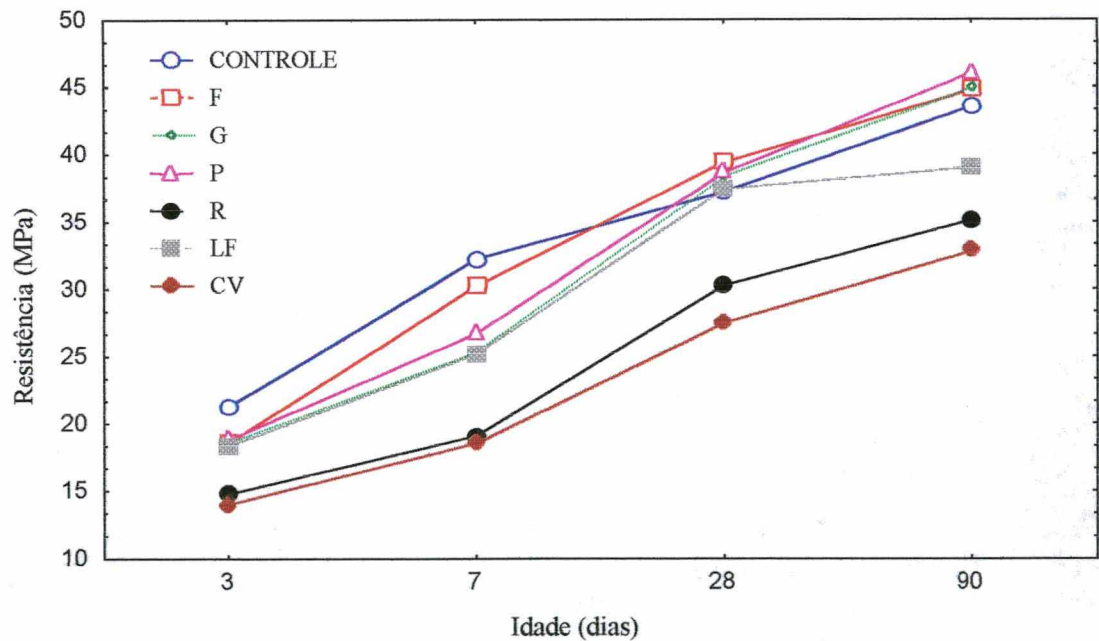


Figura 5.6 - Evolução de resistência de argamassas - 40% de CCA

Nota-se, que o desempenho da cinza de casca de arroz residual, para o teor de substituição de 15%, ultrapassa a resistência da argamassa de controle, aos 28 dias, em todos os casos; já para o teor de 40% de substituição, excluindo-se a argamassa R, a resistência das demais argamassas gira em torno da resistência da argamassa de controle. Nas duas situações, confirma-se o resultado apresentado no projeto piloto: 15% de substituição resultando um máximo de resistência à compressão e 40%, refletindo a resistência da argamassa de controle na maioria dos casos.

Das quatro cinzas de casca de arroz residuais estudadas, 3 apresentaram desempenho das argamassas compatível com o desempenho da argamassa com cinza queimada em leito fluidizado - LF -, para ambos os teores de substituição. Isto leva a crer que, pelo menos para estas cinzas, a temperatura de queima não é tão determinante no desempenho das cinzas de casca de arroz, no tocante à resistência à compressão.

Quanto à argamassa com cinza volante - CV - o desempenho das argamassas com cinza de casca de arroz residual foi superior em 100% dos casos.

Comparando a sílica ativa com as cinzas de casca de arroz residuais (teor de substituição de 15%), as cinzas P, G e F apresentaram resultados compatíveis com a SA. Percebe-se que a argamassa F mantém um desempenho ligeiramente superior, algo em torno de 1 MPa, em relação ao da SA, até os 28 dias. Aos 90 dias, essa diferença aumenta para 4 MPa, o que significa uma resistência da CCA 8% maior que o da SA. A Figura 5.7 evidencia este fato, deixando claro que, em termos de argamassa, a cinza de casca de arroz residual apresenta-se tão eficiente quanto a sílica ativa.

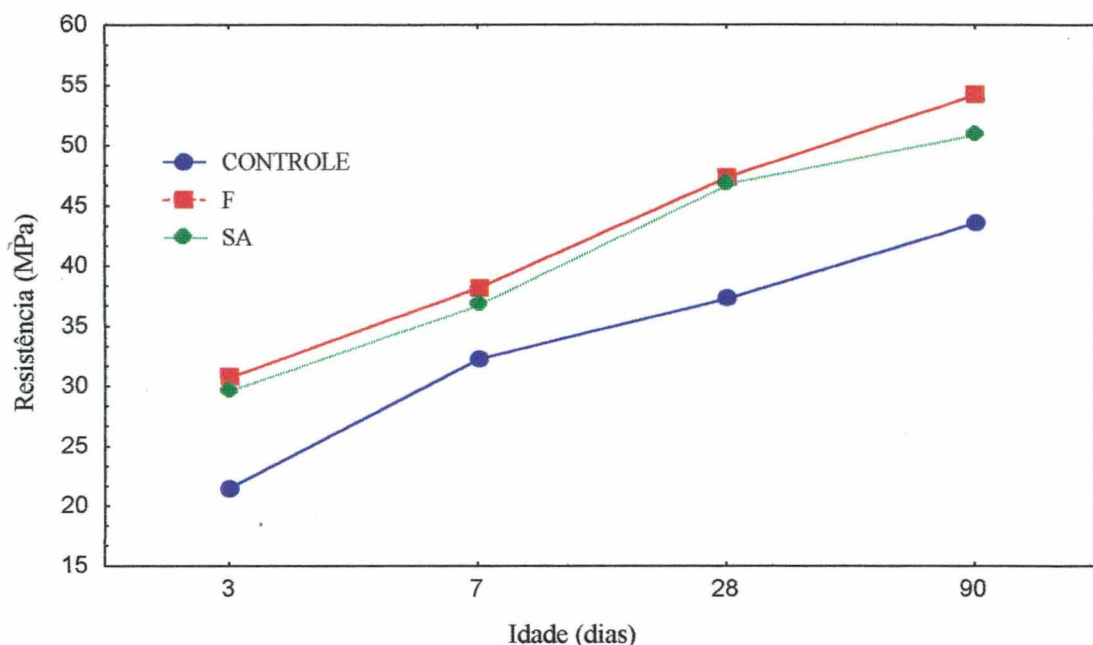


Figura 5.7 - Evolução de resistência de argamassas com CCA - F e SA

Quando comparadas entre si, a cinza de casca de arroz residual que apresentou as maiores resistências (teor de substituição de 15%), foi aquela proveniente da indústria F (processo industrial). Contudo, o ensaio de índice de atividade pozolânica, indicou os melhores resultados para a cinza da indústria P (processo semi-industrializado). Isto porque, para o ensaio de atividade pozolânica, foi fixada uma consistência e, para obtê-la, faziam-se acréscimos de água, variando a relação água/cp para cada argamassa, tendo sido este valor maior para a cinza da indústria F, em relação à da indústria P. Já no caso da resistência, foi fixada, além da consistência, uma relação água/cp, alcançando-se a consistência desejada através da incorporação de areia. Além da diferença da relação água/cp nos dois estudos, deve ser lembrado que no ensaio de IAP a temperatura de cura é de $(38 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ durante 27 dias, o que favorece claramente o desenvolvimento das reações pozolânicas. Desta forma, mesmo as cinzas que possuem alguma cristalinidade podem apresentar resultados superiores àsquelas mais amorfas. As Figuras 5.8 e 5.9 comprovam este fato. Isso nos leva a um questionamento quanto a validade de se classificar uma pozolana através do referido ensaio, nos moldes previstos hoje pela NBR 5752. A norma brasileira

volume de material a ser substituído e prevê que a consistência normal (*flow test* 225 ± 5 mm) seja obtida através do acréscimo de água, o que faz variar a relação água/aglomerante para cada mistura. O ensaio poderia refletir melhor a reatividade do material em estudo (neste caso, CCA) se fosse fixado a relação água/aglomerante igual ao da argamassa de controle, corrigindo-se a trabalhabilidade através da incorporação de areia, segundo o que prescreve a RILEM 73 SBC, tendo em vista que a relação água/ aglomerante é inversamente proporcional à resistência. Além disso, através da incorporação de agregado miúdo, com a relação água/ aglomerante constante, pode-se perceber qual material vai gerar uma maior economia de cimento, uma vez que, quanto maior a quantidade de material incorporado, menor o consumo de cimento, para uma mesma relação água/aglomerante.

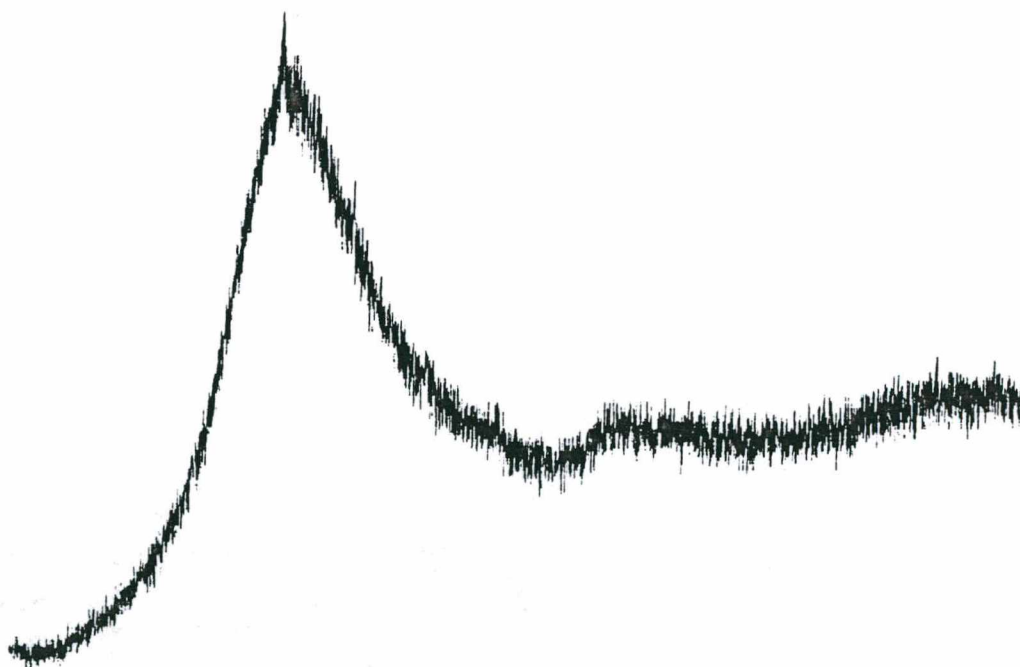


Figura 5.8 - Difratoograma de Raios-X : cinza da indústria F

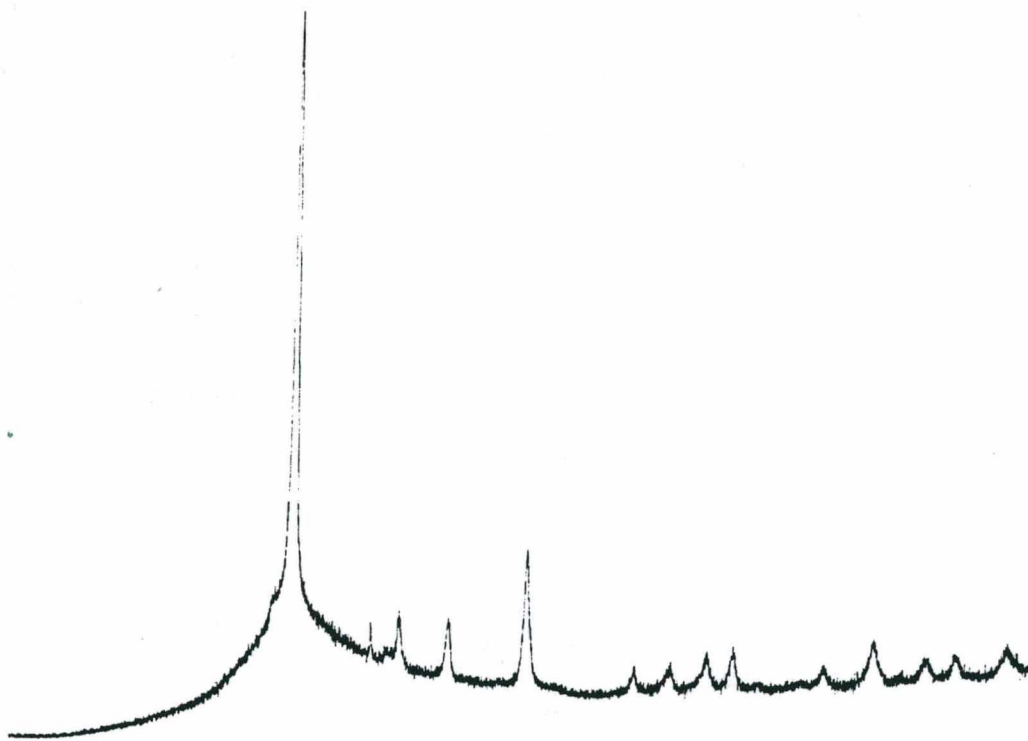


Figura 5.9 - Difratoograma de Raios-X: cinza da indústria P.

5.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE CONCRETOS

As Tabelas 5.10, 5.11 e 5.12 trazem os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão realizados aos 3, 7, 28 e 90 dias, dos corpos-de-prova de concreto com teores de substituição de 15% e 40% para cinza da casca de arroz, 15% para sílica ativa e 40% para cinza volante, para relações a/cp de 0,4; 0,5 e 0,6 respectivamente. As Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 mostram a evolução de resistência à compressão para as quatro idades, em cada uma das relações a/cp.

Tabela 5.10 - Resistência à compressão concreto - $a/c_p = 0,4$

Resistência Média (Mpa)				
Concreto	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias
Controle	34,70	39,70	45,52	55,39
SA-15	39,15	46,47	60,80	62,39
CCA-15	36,29	41,70	55,70	63,70
CV-40	22,60	26,42	41,38	47,43
CCA-40	26,74	39,79	43,29	56,66

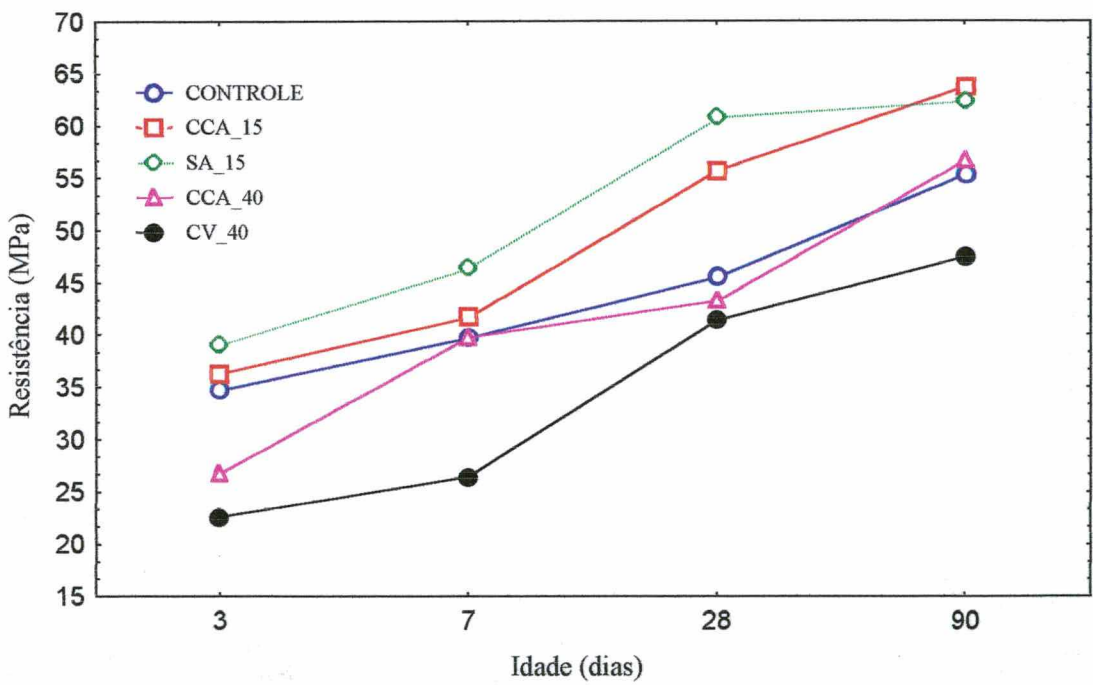


Figura 5.10 - Evolução de resistência dos concretos - $a/c_p = 0,4$

Tabela 5.11 - Resistência à compressão concreto - $a/c_p = 0,5$

Resistência Média (MPa)				
Concreto	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias
Controle	28,33	32,79	38,20	43,29
SA-15	30,80	37,56	50,61	51,57
CCA-15	26,74	34,06	44,88	49,66
CV-40	11,78	16,55	23,87	39,37
CCA-40	18,14	28,65	39,47	46,47

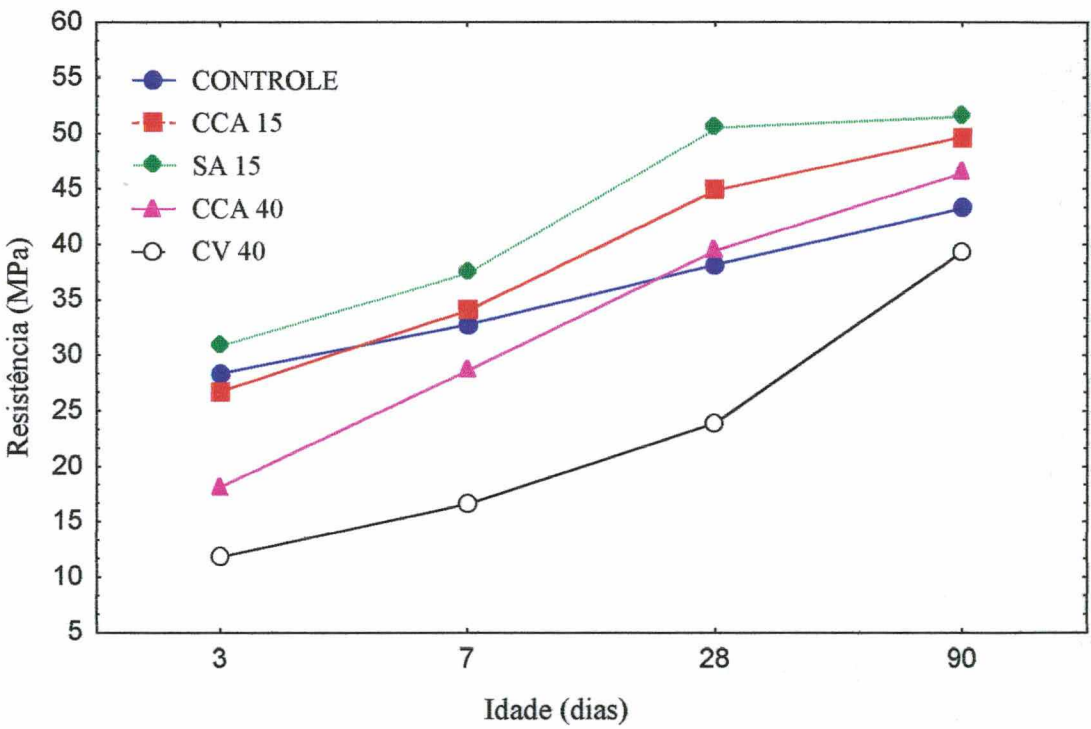


Figura 5.11 - Evolução de resistência dos concretos - $a/c_p = 0,5$

Tabela 5.12 - Resistência à compressão concreto - $a/c_p = 0,6$

Resistência Média (MPa)				
Concreto	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias
Controle	21,01	24,83	30,56	37,56
SA-15	21,65	28,65	40,11	41,38
CCA-15	17,83	25,15	35,65	59,37
CV-40	7,96	12,41	19,10	22,28
CCA-40	12,73	19,74	28,65	36,29

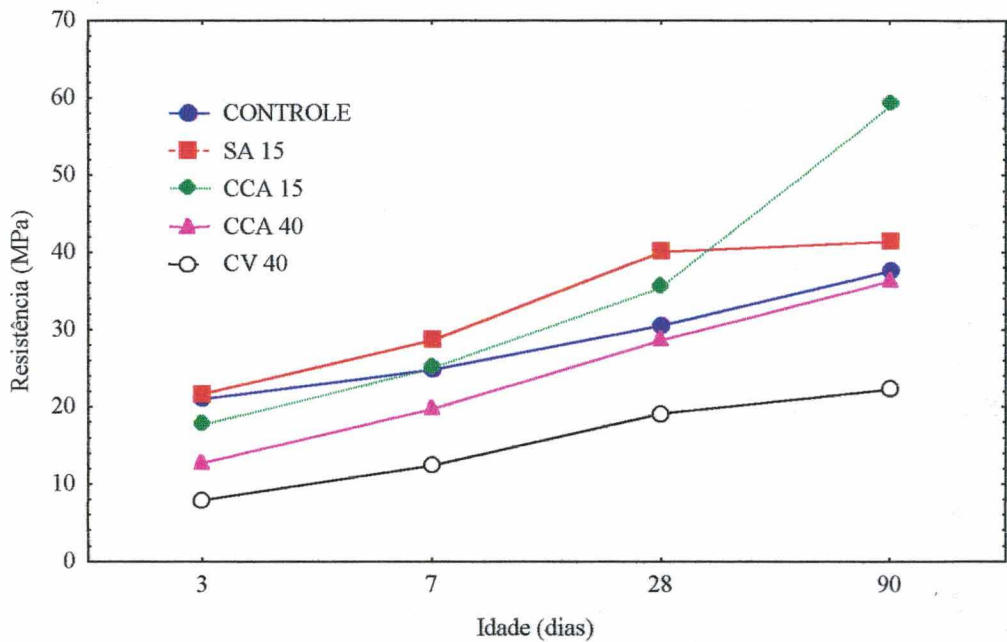


Figura 5.12 - Evolução de resistência dos concretos - $a/c_p = 0,6$

Através da análise das figuras 5.10 a 5.12, pode-se verificar que até os 28 dias, as resistências dos concretos contendo sílica ativa são potencialmente maiores do que aqueles que contém cinza de casca de arroz residual para todas as relações a/c_p estudados. Aos 90 dias, as relações 0,4 e 0,5 apresentam resistências equivalentes para a sílica ativa e cinza de casca de arroz. Para a

relação a/cp 0,6, aos 90 dias, o concreto contendo cinza de casca de arroz é potencialmente mais resistente.

Com relação à cinza volante, a cinza de casca de arroz apresentou resistências potencialmente superiores em todas as relações a/cp e idades avaliadas.

O aumento da relação água/(cimento+pozolana) gera um retardamento das reações pozolânicas, levando a um crescimento lento das resistências para os traços com relação a/cp maiores.

Segundo ZANG e MALHOTRA (1996), a alta área específica da cinza de casca de arroz, leva a uma exigência maior de aditivo redutor de água, para alcançar a trabalhabilidade desejada, quando comparada à sílica ativa. Todavia, avaliando-se o desempenho dos concretos aqui apresentados, percebe-se que o teor de materiais secos, apresentados nas Tabelas 4.27, 4.28 e 4.29, diminui para todos os concretos contendo cinza. Entretanto, esta diminuição para sílica ativa é muito maior do que para cinza de casca de arroz, fazendo concluir que a cinza de casca de arroz exigirá menos aditivo (seja ele plastificante ou superplastificante) para a correção da trabalhabilidade.

Comparando-se os resultados obtidos neste trabalho, para a resistência do concreto contendo cinza de casca de arroz residual, com aqueles apresentados por ZHANG e MALHOTRA (1996), temos que, apesar da relação a/cp ser menor no referido trabalho, a quantidade de cinza adicionada ao concreto ser maior (lá, a substituição foi feita em massa; aqui, em volume absoluto de cimento), e não se poder fazer uma análise comparativa das áreas específicas, uma vez que foram obtidas por ensaios distintos, as resistências finais obtidas pelos autores acima citados foram inferiores (Figuras 5.13 e 5.14), o que pode ser justificado pela utilização de aditivo incorporador de ar nos concretos por eles estudados.

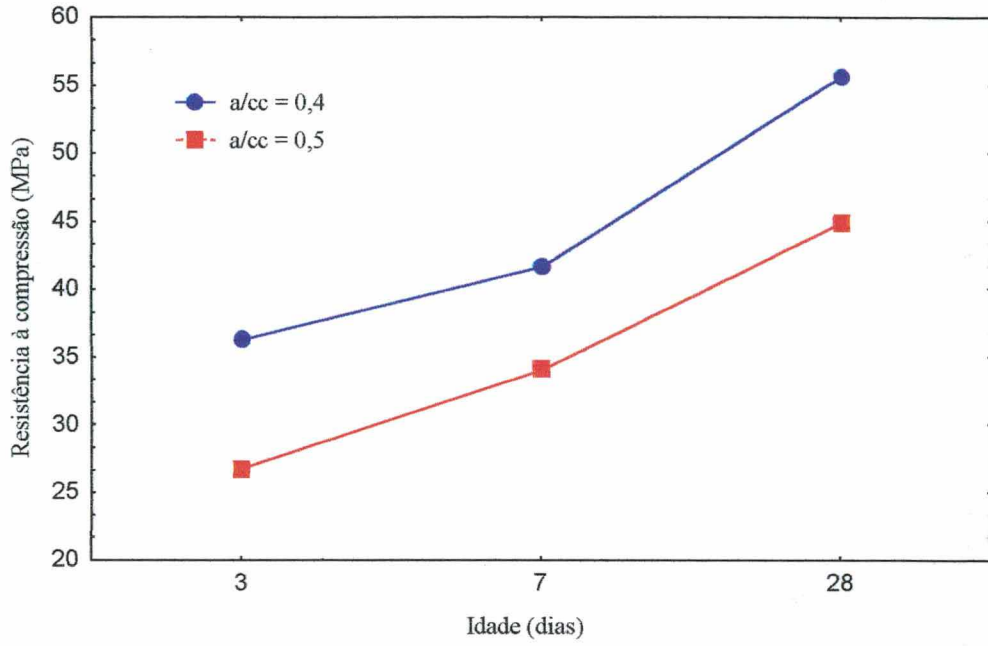


Figura 5.13 - Desenvolvimento da resistência à compressão de concretos com diferentes relação água/cp (teor de CCA em volume = 15%)

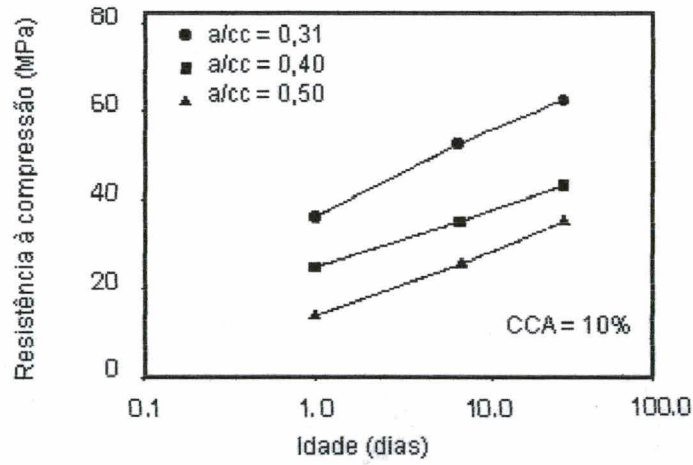


Figura 5.14 - Desenvolvimento da resistência à compressão de concretos com diferentes relação água/cp (teor de CCA = 10%). (ZHANG e MALHOTRA, 1996)

Em termos de argamassa (traço 1:3), o desempenho da cinza de casca de arroz é praticamente o mesmo que o da sílica ativa até os 28 dias. Já no concreto, é a sílica ativa que apresenta maiores resistências até esta idade. Aos 90 dias, a cinza de casca de arroz apresenta um ganho de resistência potencialmente maior que a sílica ativa tanto na argamassa como no concreto.

As Figuras 5.15, 5.16, 5.17, 5.18, 5.19 e 5.20, mostram uma correlação existente entre resistência do concreto (a/cp 0,4; 0,5 e 0,6) e argamassa (traço 1:3) contendo cinza de casca de arroz, nos teores de substituição de 15 e 40%.

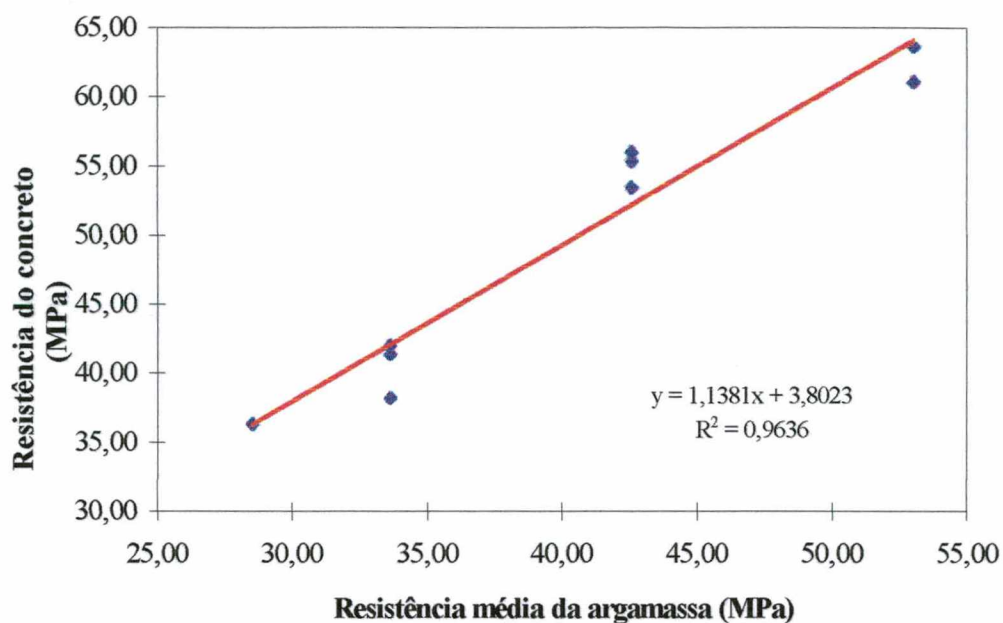


Figura 5.15 - Correlação entre resistência de concreto e argamassa contendo 15% de CCA - $a/c_p = 0,4$

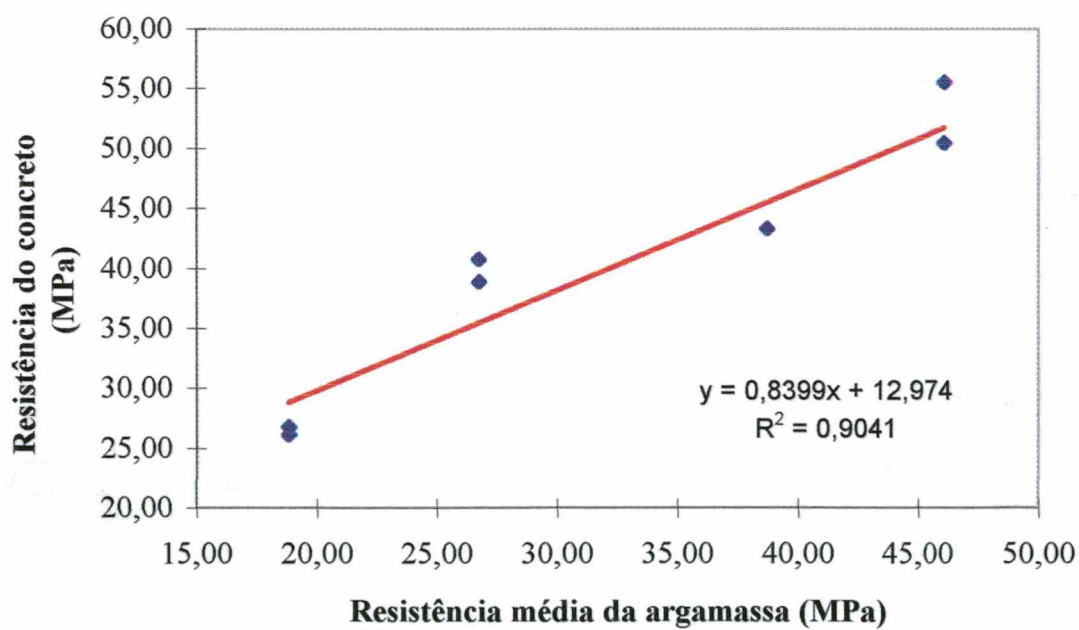


Figura 5.16 - Correlação entre resistência de concreto e argamassa contendo 40% de CCA - $a/c_p = 0,4$

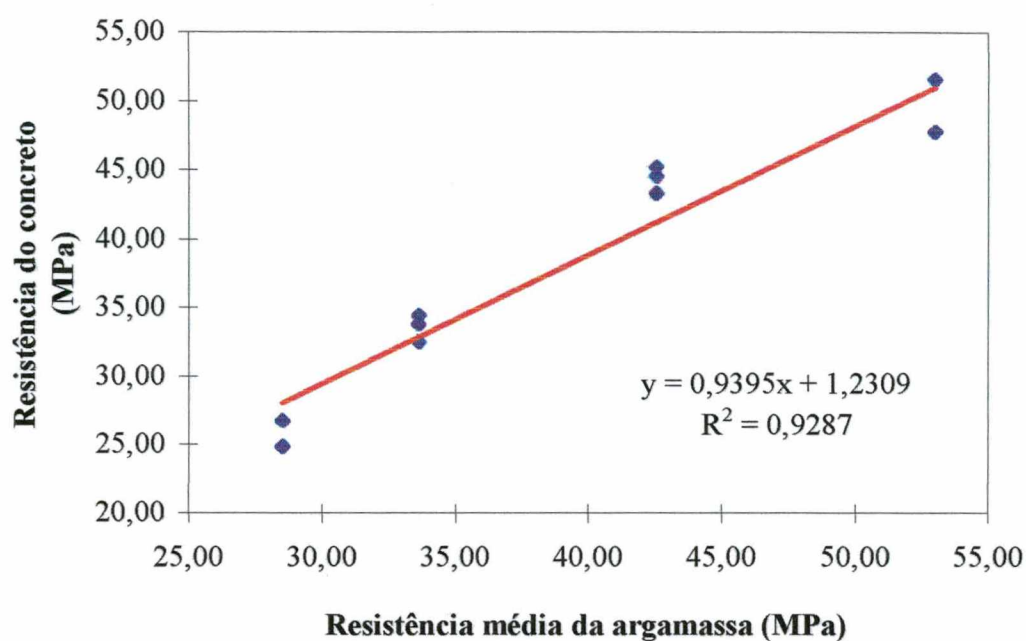


Figura 5.17 - Correlação entre resistência de concreto e argamassa contendo 15% de CCA - $a/c_p = 0,5$

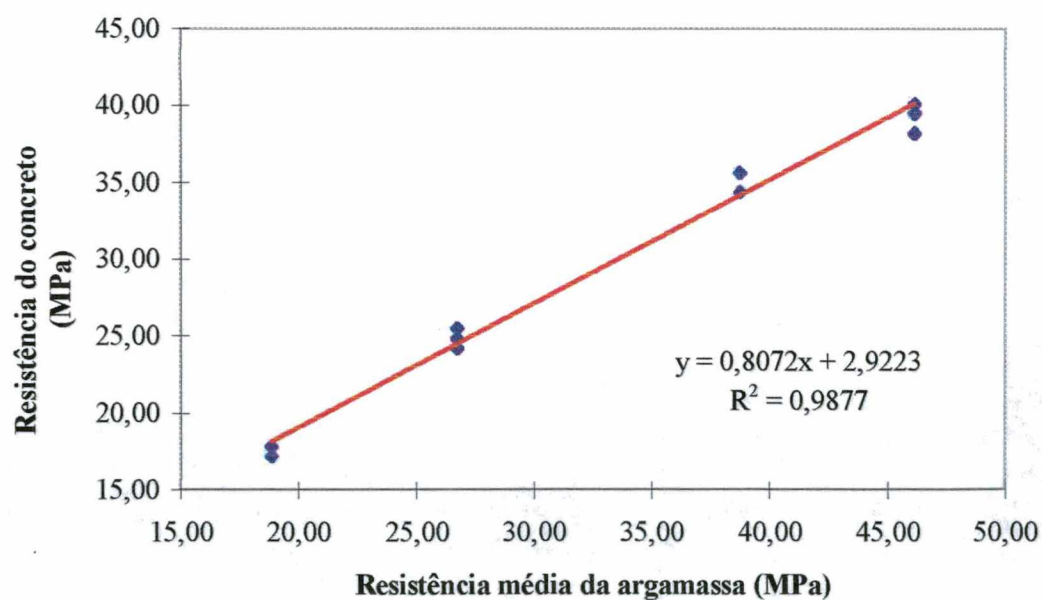


Figura 5.18 - Correlação entre resistência de concreto e argamassa contendo 40% de CCA - $a/c_p = 0,5$

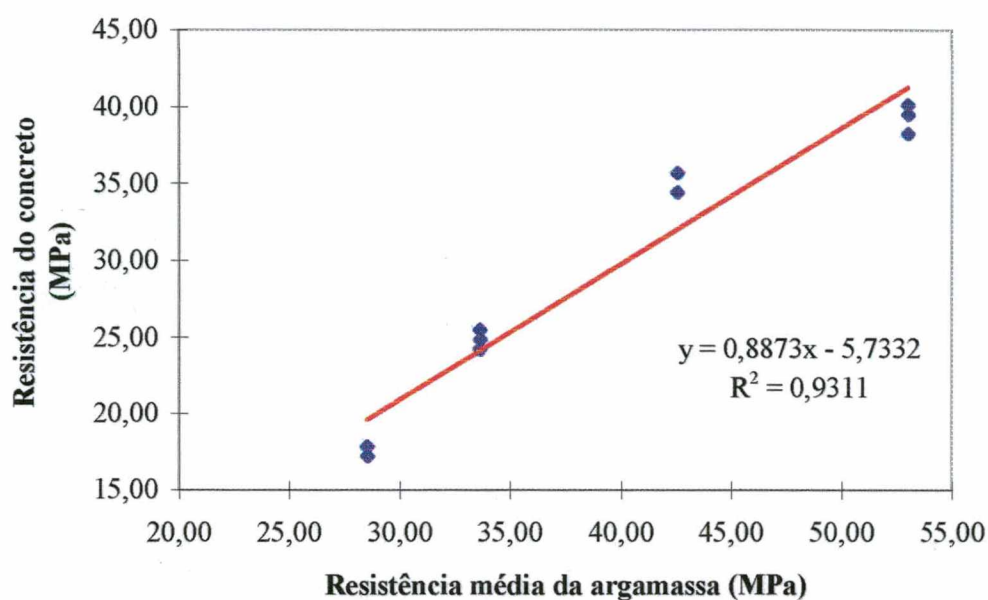


Figura 5.19 - Correlação entre resistência de concreto e argamassa contendo 15% de CCA - $a/c_p = 0,6$

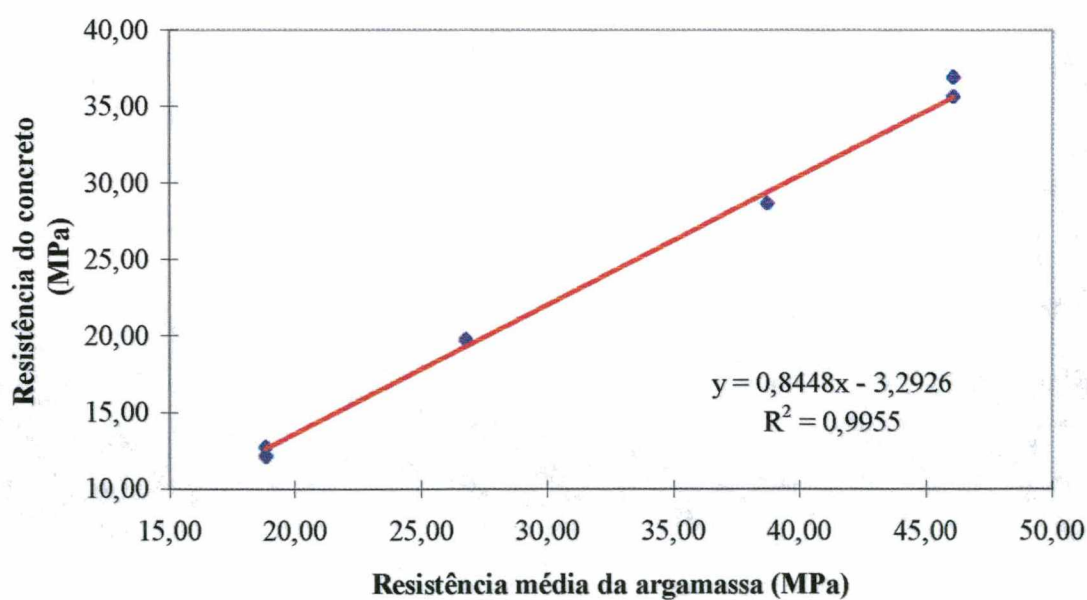


Figura 5.20 - Correlação entre resistência de concreto e argamassa contendo 40% de CCA - $a/c_p = 0,6$

Avaliando-se as correlações apresentadas, para a a/cp 0,4, o teor de substituição de 15% apresentou um coeficiente de correlação - R^2 - melhor do que o teor de 40% (0,9636 contra 0,9041). Para as relações a/cp 0, 5 e 0,6, aconteceu o contrário: os melhores coeficientes de correlação foram obtidos para o teor de substituição de 40% (0,9877 e 0,9955 respectivamente). Porém, como os coeficientes de correlação obtidos para todas as relações a/cp, em ambos os teores de substituição são considerados bons (superiores a 90%), existe um indicativo de que o ensaio de resistência da argamassa possa ser usado como parâmetro de avaliação de desempenho da cinza de casca de arroz residual em concretos.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na revisão da literatura, nos resultados experimentais e discussões mostrados nos capítulos anteriores, são apresentadas agora algumas conclusões, específicas para este trabalho, de acordo com as limitações deste estudo. Algumas sugestões de trabalhos posteriores que venham a colaborar para um melhor entendimento do comportamento da cinza de casca de arroz residual, são apresentadas ao final.

6.1 CONCLUSÕES

6.1.1 Influência do processo de queima no IAP da CCA residual

Os vários processos de queima da casca de arroz identificados no sul do estado de Santa Catarina, apresentaram cinzas cujos índices de atividade pozolânica são condizentes com o que prescreve a norma brasileira NBR 12653/92. Aqueles processos onde o material é recolhido via seca, foram os que apresentaram os melhores resultados, superando os valores obtidos para a sílica ativa, cinza volante de carvão mineral e, principalmente, foram superiores aos resultados conseguidos com a cinza de casca de arroz produzida em leito fluidizado, com controle de temperatura de queima e tempo de exposição à temperatura.

6.1.2 Influência do grau de moagem no IAP da CCA residual

Os diferentes tempos de moagem da cinza de casca de arroz, que levaram a diferentes áreas específicas do material, influenciaram de forma significativa na atividade pozolânica do mesmo. A cinza produzida pelo processo industrializado, apresentou melhor atividade pozolânica para um tempo de moagem de 4 horas (área específica Blaine média 1680,33 m²/kg), havendo um decréscimo no resultado para um tempo de moagem de 6 horas (área específica Blaine média 1881 m²/kg). Os demais processos apresentaram resultados crescentes com o grau de moagem. Isto nos faz concluir que, cada cinza, em função do processo de queima, apresenta um grau de moagem ótimo, que leva a um índice de atividade pozolânica máximo. A partir deste ponto, específico para cada cinza, o aumento da área específica pode dificultar a dispersão da pozolana na argamassa, diminuindo seu IAP. Todavia, este tempo de moagem ótimo pode ser muito elevado, levando a um consumo de energia para a moagem demasiadamente alto. Daí há necessidade de uma caracterização de cada material para estabelecer qual tempo de moagem levaria a um material eficiente, do ponto de vista da engenharia e, ao mesmo tempo, econômico.

6.1.3 Resistência das argamassas produzidas com CCA residual

As argamassas confeccionadas com as cinzas de casca de arroz residuais, produzidas pelos diferentes processos de queima identificados no sul do estado de Santa Catarina, apresentaram resultados significativos sobre sua resistência à compressão, observando-se um ganho médio de resistência da ordem de 15 %, aos 28 dias, para um teor de substituição de 15%. Para uma substituição de 40%, aos 28 dias, a resistência média das argamassas foi equivalente à argamassa de controle. Quando comparadas às resistências das argamassas contendo sílica ativa, cinza volante e cinza de casca de arroz produzida em leito fluidizado, a cinza de casca de arroz residual apresentou desempenho compatível com o desempenho da sílica ativa e significativamente superior àqueles apresentados pelas outras pozolanas de referência.

6.1.4 Resistência dos concretos produzidos com CCA residual

Produzidos com os mesmos teores de substituição utilizados para as argamassas, que foram 15% e 40%, os concretos confeccionados com cinza de casca de arroz residual apresentaram desempenho semelhante ao das argamassas. De forma geral, a cinza de casca de arroz apresentou desempenho ligeiramente inferior até os 28 dias, equivalente ao da sílica ativa aos 90 dias e superou o desempenho da cinza volante em todas as idades. O fato da incorporação de agregado aos concretos ter apresentado maiores valores para aqueles que contém cinza de casca de arroz residual, em relação ao que contém sílica ativa, pode indicar um menor consumo de aditivo redutor de água, visando corrigir a trabalhabilidade, para os concretos confeccionados com CCA.

6.1.5 Uso da CCA residual em substituição parcial do cimento Portland

A cinza de casca de arroz residual mostrou ser uma pozolana altamente reativa, para os graus de moagem adotados neste estudo, provando ser viável seu uso em substituição parcial do cimento Portland, para a confecção de argamassas e concretos. Todavia a utilização isolada de uma das cinzas aqui apresentadas, vai requerer um estudo específico de sua pozolanicidade e, da mesma forma, dos teores ótimos de substituição, tendo em vista o objetivo de seu emprego, já que, os teores que aqui foram adotados, partiram de um estudo piloto, com uma cinza escolhida em função da sua disponibilidade. De outra forma, poderia-se utilizar o resíduo de forma conjunta, fazendo-se uma homogeneização *in natura*, das cinzas aqui apresentadas, na mesma proporção (em massa ou volume) e, a seguir, partindo-se para sua caracterização, determinando índice de atividade pozolânica e desempenho em argamassas e concretos com diferentes teores de substituição.

6.2 RECOMENDAÇÕES PARA OUTROS TRABALHOS

Com o objetivo de suprir algumas dúvidas surgidas no decorrer do desenvolvimento da pesquisa, são feitas algumas propostas de trabalho, para um melhor entendimento do desempenho das cinzas de casca de arroz residuais como pozolanas:

- a) coleta de amostras em intervalos de tempo menores (durante o período de um ano), para o monitoramento das propriedades pozolânicas da cinza, identificando os fatores que levam à variação dessas propriedades ao longo do tempo.
- b) acompanhamento do desempenho de resistência dos concretos e argamassas em idades superiores a 90 dias;
- c) análise da mudança de microestrutura do concreto provocada pela substituição parcial de cimento Portland por cinza de casca de arroz residual em diferentes teores, principalmente na região da interface pasta/agregado.
- d) avaliação da compatibilidade da cinza de casca de arroz residual com aditivos, em especial os redutores de água, visando sua utilização na confecção de concretos de elevado desempenho;
- e) verificação do comportamento de concretos e argamassas confeccionados com CCA residual, quanto a aspectos de durabilidade: penetração de cloretos, ataques ácidos e carbonatação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-KHALAF, M.N., YOUSIFT, H.A. Use of rice husk ash in concrete. **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete** V.6, n. 4, 1984, p.241-248.

AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. **Annual Book of ASTM Standards**. Standard Specification for Fly ash Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixtures in Portland Cement Concret. ASTM c 618. Philadelphia, 1978.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto - Procedimento.**: NBR 5738 Rio de Janeiro, 1994.

_____, **Ensaio de compressão de corpos-deprova cilíndricos de concreto**. NBR 5739. Rio de Janeiro, 1974.

_____, **Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica com cal Portland. - Índice de atividade pozolânica**: NBR 5751. Rio de Janeiro, 1977. 3p.

_____, **Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland. - Índice de atividade pozolânica**: NBR 5752. Rio de Janeiro, 1992. 3p.

_____, **Cimento Portland Pozolânico - Determinação da pozolanicidade**: NBR 5753. Rio de Janiro, 1977. 5p

_____, **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**: NBR 6474. Rio de Janeiro, 1984.

- _____. **Agregados para concreto.** NBR 7211. Rio de Janeiro, 1983.
- _____. **Cimento Portland - Determinação de resistência à compressão:** NBR 7215. Rio de Janeiro, 1982. 15p.
- _____. **Agregado - Determinação da composição granulométrica:** NBR 7217. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **Agregado - Determinação de impurezas orgânicas e húmicas em agregado miúdo:** NBR 7220. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone:** NBR 7223. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da área específica:** NBR 7224 Rio de Janeiro, 1984.
- _____. **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura por meio da peneira 0,044mm (número 325):** NBR 9202 Rio de Janeiro, 1985.
- _____. **Agregado - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de Chapmann** NBR 9776. Rio de Janeiro, 1986.
- _____. **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura por meio da peneira número 200:** NBR 11579. Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **Cimento Portland - Determinação do tempo de pega:** NBR 11582 Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **Materiais pozolânicos - Especificação** NBR 12653. Rio de Janeiro, 1992.
- BOETENG, A. A., SKEET, D.A. Inceneration of rice hull for use as a cementitious material: the Guyana experience. **Cement and Concret Research**, 1990, v.20, p.795-802

- BENTUR, A. The role of the interface in controlling the performance of high quality cement composites. In: **Engineering Foundation Conference on Advances in Cement Manufacture and Use**. Proceedings...The Engineering Foundation, 1989, p.227-237.
- CALLEJA, J. Adiciones y cementos con adiciones. **Materiales de Construction** nº190-191, 1983, Madrid, p25-52.
- CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **Supplementary Cementing Materials**. CSA A23.4 M86. Ottawa, 1986
- CIENTEC - FUNDAÇÃO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Relatório final do projeto de pesquisa aproveitamento energético da cinza de casca de arroz. Porto Alegre, 1986. 167 p.
- CINCOTTO, M.A., KAUPATEZ, R.M.Z. Seleção de materiais quanto à atividade pozzolânica: **Tecnologia das Edificações**. Pini, São Paulo, 1988, p.23-26.
- COOK, D.J., Rice husk ash. **Concrete Technology and Design**, V.3, Surrey University Press, London, 1986, p.171-196.
- DIAMOND, S. Mineral pozzolanic reaction in one year old fly ash pastes: an SEM evaluation. In **International Conference On Cement Microscopy, 11th**. New Orleans, 1989. Proceedings... p.263-274.
- FARIAS, J.S.A.; RECENA, F.A.P. Study for Brazilian rice husk ash cement. In: **Proceedings of the second international RILEM symposium**. H.S. Sobral (ed.) Salvador, 1990. p. 360-369.
- FUNDAÇÃO IBGE **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Rio de Janeiro, 1996, v. 8, nº 12, 70p.
- GUEDERT, L.O. **Estudo da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da cinza de casca do arroz como material pozzolânico**.

- Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas - UFSC. Florianópolis, 1989, 147p
- GJORV, O.E., High strength concrete. In: **MALHOTRA, V.M. (ed) Advances in Concrete Technology**. Ottawa: Energy Mines Resources, 1992, p.21-78.
- HELENE, P.R.L., TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. Ed Pini, São Paulo, 1992, 349p.
- HOUSTON, D.F., Rice Hulls, Rice Chemistry and Technology (editor: D. F. Houston), **American Association of Ceveral Chemistry**.1972, Minnessota, p301-352.
- HWANG, C. L., WU, P. S. Proprieties of cement past containing rice husk In: **MALHOTRA, V.M. (ed) International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete**, 3rd, 1989, Trondheim, Detroit: American Concrete Institute, 1989, 2v, v 2, p. 733-762.
- ISAIA, G.C.**Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolnas em concreto de elevado desempenho: um estudo da durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- JAMES, J., RAO, M.S. Reativity of rice husk ash. **Cement and Concrete Research**. V16, 1986, p.296-302.
- LEA, F.M. The chemistry of cement and concrete. **Chemical Publishing Company**, 1971, p.1-10.
- LUXAN, M. P. Rapide evaluation of pozzolanic activity of natural products by condutiivty measurement. **Cement and Concrete Research**, V. 9, 1989, p.63-68.
- MEHTA, P. K. Pozzolanic and cementitious by-products in concrete - another look. In: **International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and**

- Natural Pozzolans in Concrete**, 3rd, Trodheim, 1989. Proceedings...
Detroit: American Concret Institue, 1989, V1, p.1-44 .
- _____., Mineral admixtures. **Concrete Admixtures Handbook-Proprieties, Science and Technology**. Ed. V.S. Ramachandran, Ottawa, Canadá, 1990, p.303-333.
- _____., Rice husk ash- a unique supplementary cementing material. In: MALHOTRA, V.M. (ed) **Advances in concrete technology**.CANMET. 1992,Otawa. p.407-432.
- METHA, P.K., MALHOTRA, V.M. Pozzolanic and cementitious material. **Advances in Concrete Technology**, V.1, CANMET, Canadá, 1996.
- MEHTA, P.K. MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. Ed Pini, São Paulo, 1984, 573 p
- METHA, P.K., PITT, N. A new proocess of rice utilization. In: **International Conference on the Utilization of Rice By-Products**. Valencia, Spain, 1974. Proceedings...Valencia: IATA, 1977, p.45-58.
- MEHTA, P. K., POLIVKA, M. Use of Highly active pozzolans for reducind expansion in concrete containing reactive aggregate. **Living with marginal aggregates**, ASTM STP 597, 1976, p.25-53.
- NEVILLE, A.M., **Propriedades do Concreto**. Ed. PINI-2ª edição, São Paulo, 1997, 787p.
- NIMITYONGSKUL, P., SILVA, M.W.J.A., KARASUDHI, P. Curent stage of research on reactivity of rice husk ash. In:**Simposio Internacional soobre Tecnologia del Concreto**, 5. Monterrey, 1981, p.185-216.
- ÖLMEZ H., HEREN, Z. Making a pozzolanic rice-husk ash and its use in acid resistance cements . In: MALHOTRA, V.M. (ed) **International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in**

Concrete, Proceedings. 1989, Detroit: American Concrete Institute, p851-861.

PRUDÊNCIO JR, L.R, SANTOS, S. Influência do grau de moagem na pozolanicidade da cinza de casca de arroz. In: **Seminário sobre Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção.** São Paulo, 1996, p.53-62.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE 73-SBC. **Siliceous by-products for use in concrete.** Final Report., Mater. Struct. 1988.

SALLAS, J et al. Empleo de cenizas de cascara de arroz como adiciones en morteros. **Materiales de Construcción**, 1986, Madrid, V.36 n. 203.

SANTAMARIA, F.S., Las puzolanas y ahorro energétívco en los materiales de construcción. **Materiales de Caonstrucción**, 1983, n190-191, p. 69-84.

SILVA, M.B.C. **O uso da casca de arroz para a confecção de painéis de forro.** Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Unversidade Federal do RIO Grande do Sul. Porto Alegre. (em conclusão)

SILVEIRA, A.A. **A utilização da cinza de casca de arroz com vistas a durabilidade de concretos: estudo do ataque por sulfatos.** Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Unversidade Federal do RIO Grande do Sul. Porto Alegre, 1996. 139 p.

SILVEIRA, A.A., RUARO, P. A adição de cinza de casca de arroz em concretos: Estudo da influência do tipo de cinza na resistência à compressão e na microestrutura do concreto. **Seminário da Dusciplina de Novos Materiais.** Curso de Pós-Graudação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995,

SÍNTESE ANUAL DE AGRICULTURA DE SANTA CATARINA - 1995. Florianópolis, 1996, p.79-80.

SMITH, R.G., Rice husk ash cement small scale production for low cost housing.

In: **Internacional Conference on Lowcost Housing for Developing Countries**, Roorkee, India, 1984. Proceedings... Roorke, Central Building Research Institute, p. 887-895.

SUGITA, S., SHOYA, MA., TOKUDA, H. Evaluation of pozzolanic activity of rice husk ash.. In: MALHOTRA, V.M. (ed) **International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete**, 4th, 1992, Istanbul. *Proceedings*. Detroit: American Concrete Institute, 2v, v1, p.495-512.

SWAMY, R.N. Fly ash and slag: standards and specifications - help or hindrance?

Materials and Structures, RILEM 26.200-613, 1993, p.600-613.

XU, A., SARKAR, L. NILSON, L.O., Effect of fly ash on the microstructure of cement mortar. **Materials and Structures**, London, V.26, n16, 1993, p. 414-424.

ZANG, M.-H., MALHOTRA, V.M, High-performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material. In: **ACI Material Journal**, 1996. v.93, n° 6, p. 629-636.